

**MODELLIZZAZIONE DELLA DIFFUSIONE DEL MATERIALE  
SEDIMENTARIO RISOSPESO DURANTE I LAVORI DI  
ESCAVO E DI SVERSAMENTO IN MARE APERTO**



**LAVORI DI ESCAVO PER ADEGUAMENTO DEI FONDALI  
ANTISTANTI IL PRIMO TRATTO DELLA BANCHINA 26 DEL  
PORTO DI ANCONA  
e  
SIMULAZIONI SU TUTTE LE CELLE DELL'AREA DI  
SVERSAMENTO**

**COORDINATORE:** Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, ANCONA)

**RESPONSABILE SCIENTIFICO:** Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, ANCONA)

**Rapporto a cura di :** Dott.ssa Gianna Fabi (CNR-ISMAR, ANCONA)  
Dott. Christian Ferrarin (CNR-ISMAR, Venezia)  
Dott.ssa Alessandra Spagnolo (CNR-ISMAR, ANCONA)

**Preparato per:** AUTORITÀ PORTUALE DI ANCONA

**AGOSTO 2015**

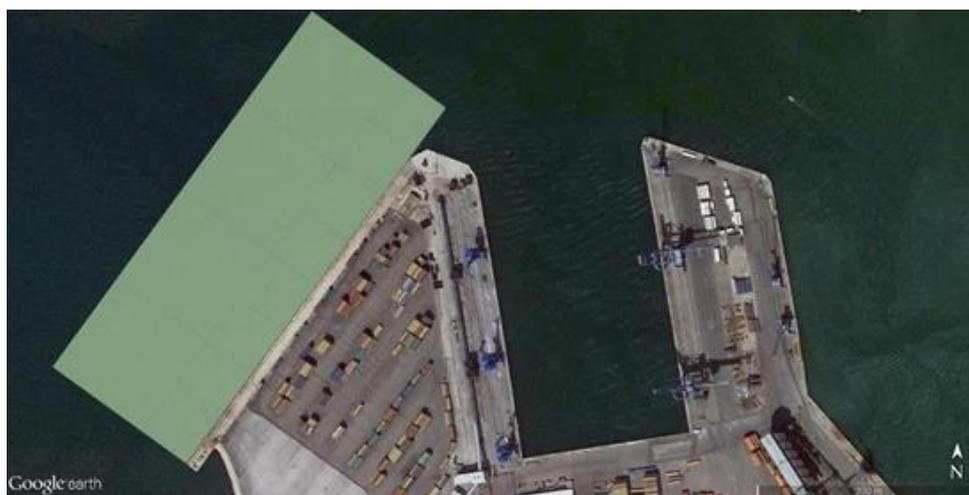
## INDICE

<b>1. PREMESSA.....</b>	<b>1</b>
1.1. FENOMENOLOGIA GENERALE DEL MARE ADRIATICO .....	2
<b>2. DESCRIZIONE DEL MODELLO .....</b>	<b>4</b>
2.1. IL MODELLO IDRODINAMICO SHYFEM .....	4
2.2. IL MODELLO DI TRASPORTO E DIFFUSIONE PER SALINITÀ E TEMPERATURA.....	6
2.2.1 Modulo di calore .....	7
2.3. I MODELLI DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI .....	8
2.3.1 Modello lagrangiano di trasporto dei sedimenti .....	9
2.3.2 Modello euleriano di trasporto dei sedimenti .....	10
<b>3. APPLICAZIONE DEL MODELLO .....</b>	<b>11</b>
3.1. LA GRIGLIA DI CALCOLO .....	11
3.2. SET-UP DELLE SIMULAZIONI .....	12
3.3. VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO .....	13
<b>4. DESCRIZIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI METEOMARINI .....</b>	<b>15</b>
<b>5. SCENARI DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI .....</b>	<b>18</b>
5.1. SCENARIO 1 - CALMA DI VENTO.....	20
5.2. SCENARIO 2 - VENTO DI BORA .....	22
5.3. SCENARIO 3 - VENTO DI SCIROCCO.....	24
5.4. SCENARIO 4 - VENTO DI MAESTRALE .....	26
<b>6. CONCLUSIONI.....</b>	<b>28</b>
<b>7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....</b>	<b>31</b>
<b>ALLEGATO A - SIMULAZIONI CELLE DI SVERSAMENTO.....</b>	<b>33</b>
I. DESCRIZIONE DEI SITI DI SVERSAMENTO E DEGLI SCENARI.....	34
II. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI .....	35
III. CONCLUSIONI.....	45

## 1. PREMESSA

L'attività di ricerca svolta da CNR-ISMAR sede di Venezia si inserisce nella convenzione tra Autorità Portuale di Ancona (APA) e CNR-ISMAR ai fini dell'esecuzione di studi di carattere ambientale volti a valutare le dinamiche e gli effetti dei sedimenti marini provenienti dall'escavo effettuato per adeguare i fondali antistanti il primo tratto della banchina 26 del porto (Fig. 1).

Tali attività hanno previsto lo sviluppo di un modello di trasporto idrodinamico volto a valutare la potenziale dispersione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo nell'area portuale e di sversamento in mare aperto. Scopo di tale modello è verificare se, in quali condizioni meteomarine, e in quale entità, tale materiale potrebbe raggiungere i fondali costieri della costa del Monte Conero e quindi produrre eventuali impatti sulle biocenosi ivi esistenti.



**Fig. 1** – Ubicazione area di escavo.

L'obiettivo principale di questo studio è l'indagine delle dinamiche di trasporto di sedimenti marini provenienti da escavi portuali. L'approccio metodologico proposto in questo progetto si basa sull'integrazione delle acquisizioni sperimentali con strumenti modellistici.

Le aree esterne di sversamento sono influenzate direttamente dall'area più settentrionale del Mar Adriatico a causa della corrente costiera adriatica che, fluendo verso Sud-Est lungo la costa italiana, trasporta con sé le acque scaricate in mare dai fiumi del Nord Adriatico, mescolate alle acque marine costiere (Franco *et al.*, 1982). E' chiaro che un problema così complesso come il trasporto dei sedimenti è intimamente collegato con lo stato idrodinamico della zona di interesse.

Un'indagine dei sedimenti deve perciò partire da un approfondito esame e dalla descrizione dell'idrodinamica costiera.

La simulazione della circolazione delle acque dei principali processi fisici che interessano le aree costiere necessita l'utilizzo sia di modelli numerici ad alta risoluzione spazio-temporale sia di procedure di *downscaling* in grado di riprodurre le interazioni e gli scambi di massa che avvengono tra l'ambiente di mare aperto e l'ambiente costiero. Tale obiettivo può essere raggiunto sia mediante l'implementazione di procedure di *nesting* tra modelli numerici basati su griglie di calcolo regolari (Kim *et al.*, 2008; Brown *et al.*, 2010), sia mediante l'utilizzo di modelli numerici basati su griglie non strutturate in grado di riprodurre i processi di interesse con una risoluzione spaziale variabile (Bellafiore *et al.*, 2008; Roland *et al.*, 2009). Il primo approccio è comunemente utilizzato all'interno di diversi sistemi operazionali per effettuare procedure di *nesting* da sistemi di previsione a scala di bacino a scala regionale. Tali procedure di accoppiamento sono generalmente robuste e ben testate, tuttavia non prevedono la possibilità di riprodurre le interazioni tra le diverse scale spaziali in modo biunivoco (*downscaling* e *upscaling*). Il secondo approccio basato sull'utilizzo di modelli a griglia non-strutturata, quali quelli basati sul metodo degli elementi finiti o dei volumi finiti, permette, variando la risoluzione spaziale del dominio di calcolo, di riprodurre facilmente le interazioni biunivoche (*downscaling* e *upscaling*) tra gli ambienti di costieri e quelli di mare aperto.

Molti sono i modelli utilizzati per studiare la circolazione del mare Adriatico (Bellafiore, 2009). Quattro di queste applicazioni sono basate sul modello *Princeton Ocean Model (POM)* (Blumberg e Mellor, 1987): il sistema *AIM- NASM* sviluppato da Zavatarelli *et al.* (2002), lo studio effettuato da Oddo *et al.* (2005); Oddo e Pinardi (2008), l'implementazione di Bergamasco *et al.* (1999) e il sistema *NCOM* (Pullen *et al.*, 2003). Altri modelli applicati sono il *DieCAST*, descritto in Cushman-Roisin *et al.* (2005), il modello *ROMS* (Sherwood *et al.*, 2004) e il modello *MITgcm* applicato al Golfo di Trieste (Crise *et al.*, 2003).

## **1.1. FENOMENOLOGIA GENERALE DEL MARE ADRIATICO**

Il mare Adriatico è un bacino allungato e relativamente stretto, caratterizzato da un'ampia porzione di coste di varie tipologie. A tratti litoranei regolari come quelli del Centro Italia si contrappongono aree più frastagliate e, quindi, più complesse da

studiare, quali le coste della Croazia. Il bacino si può dividere topograficamente in tre aree principali (Orlić *et al.*, 1992):

- la parte Nord, caratterizzata da profondità inferiori ai 40 m;
- la parte centrale, avente una profondità massima di 280 m (*Jabuka Pit*);
- la parte Sud, che nella fossa più profonda raggiunge i 1200 m.

Il comportamento del bacino va considerato alla luce delle forzanti che maggiormente influiscono sullo stesso. Primario è il ruolo della forza gravitazionale, del vento e della pressione atmosferica. Si possono osservare tre tipologie di fenomeni prodotti da queste forzanti: marea, sesse e *storm surge*. La forza gravitazionale e quella centrifuga attorno ai centri di massa nei sistemi Terra-Luna e Terra-Sole producono il fenomeno di marea astronomica. Essa viene calcolata mediante il cosiddetto *metodo armonico* e in Adriatico, da vari studi condotti nello scorso secolo (Polli, 1960; Tomasin e Pirazzoli, 1999), si può dedurre il comportamento, quasi totalmente, tramite l'azione di sette componenti principali, calcolate sul livello del mare, quattro semidiurne, M<sub>2</sub>, S<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, e tre diurne, K<sub>1</sub>, O<sub>1</sub>, P<sub>1</sub>.

Importanti sono anche gli apporti prodotti da fattori atmosferici, variazioni della pressione atmosferica e del vento. La variabilità è alla base di oscillazioni di lungo periodo, mentre il vento agisce, direttamente, nella formazione della *storm surge* e, indirettamente, come risposta del bacino, nella produzione di sesse.

I gradienti di temperatura e salinità, cause della variazione di densità, sono invece alla base delle correnti barocline e della circolazione termoalina. In Nord Adriatico la circolazione invernale di natura termoalina è guidata dai gradienti di densità tra l'acqua densa al centro del bacino e quella più leggera lungo le coste, di origine fluviale. Osservando la colonna d'acqua si riscontra una struttura omogenea in inverno, mentre tende a prevalere una struttura stratificata in estate a causa dei termo-alò-picno cicli stagionali (Franco *et al.*, 1982).

Per una completa descrizione della fenomenologia dell'Alto Adriatico si rimanda a Bellafiore (2009).

## **2. DESCRIZIONE DEL MODELLO**

Data la complessità dei fenomeni da studiare e da monitorare, si propone una gerarchia di modelli agli elementi finiti che riescono a descrivere la dinamica della dispersione e del trasporto dei sedimenti. I modelli numerici sviluppati vengono di seguito elencati:

- modello 3D idrodinamico;
- modello di dispersione e diffusione per salinità e temperatura;
- modelli di trasporto dei sedimenti (euleriano e lagrangiano).

I moduli sono integrati e accoppiati tra loro in modo sequenziale e utilizzano la stessa griglia di calcolo agli elementi finiti. Per prima cosa viene risolta l'idrodinamica, calcolando per ogni punto il livello della marea e le velocità. Il modello di trasporto dei sedimenti utilizza le forzanti idrodinamiche per calcolare il trasporto del sedimento in sospensione.

Di seguito vengono descritti i singoli modelli.

### **2.1. IL MODELLO IDRODINAMICO SHYFEM**

Per questo studio è stato utilizzato il modello matematico SHYFEM, sviluppato negli ultimi anni al ISMAR-CNR di Venezia (Umgiesser e Bergamasco, 1995; Umgiesser, 1997; Umgiesser *et al.*, 2004; Bellafiore e Umgiesser, 2010).

Il modello utilizza il metodo degli elementi finiti per la discretizzazione nello spazio e uno schema semi-implicito per l'integrazione nel tempo. Il metodo degli elementi finiti è altamente flessibile grazie alla suddivisione del dominio numerico in triangoli di varia forma e dimensione. È particolarmente adatto a riprodurre la geometria e l'idrodinamica di sistemi complessi, come la zona portuale di Ancona.

Il modello risolve le equazioni primitive, integrate verticalmente su ogni livello. La diffusione orizzontale, il gradiente di pressione e l'avvezione baroclina nell'equazione del momento sono trattati in modo esplicito. La forza di Coriolis e il gradiente di pressione barotropica nell'equazione del momento e il termine divergenza nella equazione di continuità sono trattati in modo semi-implicito. I termini di stress verticale e il termine di attrito al fondo sono trattati in implicito per ragioni di stabilità. La caratteristica fondamentale del metodo semi-implicito è che unisce i vantaggi di uno schema implicito, incondizionata stabilità per ogni passo

temporale scelto, con quelli dello schema esplicito, quali la riduzione della matrice di risoluzione.

Per il calcolo della diffusività verticale e viscosità è stato utilizzato uno schema di chiusura turbolenza. Questo schema è un adattamento del modulo k- $\mathcal{E}$  del modello *GOTM (General Ocean Turbulence Model)* descritto in Burchard e Petersen (1999). Le velocità sono calcolate al centro di ogni elemento, mentre il livello temperatura e salinità è calcolato nei nodi della griglia. Verticalmente il modello descrive la colonna d'acqua tramite livelli Z di diverso spessore. La maggior parte delle variabili sono calcolate al centro di ogni strato, mentre i termini di stress e le velocità verticali sono risolti alle interfacce tra gli strati.

Le equazioni, integrate in ogni livello, sono:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial U_l}{\partial y} - fV_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \\ - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^{top(l)} - \tau_x^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 U_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial V_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial V_l}{\partial y} + fU_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \\ - \frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^{top(l)} - \tau_y^{bottom(l)}) + A_H \left( \frac{\partial^2 V_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_l}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + \sum_l \frac{\partial V_l}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

dove:

$l$  = livello verticale,

$(U_l, V_l)$  = trasporti orizzontali in ogni livello (velocità integrate),

$f$  = parametro di Coriolis,

$p_a$  = pressione atmosferica,

$g$  = accelerazione gravitazionale,

$\zeta$  = livello del mare,

$\rho_0$  = densità media del mare,

$\rho = \rho_0 + \rho$  = densità del mare,

$\tau$  = stress interni alla superficie e al fondo di ogni strato,

$h_l$  = spessore dello strato

$H_l$  = profondità del fondo dello strato  $l$ ,

$A_H$  = viscosità orizzontale.

Le condizioni al contorno per i termini di stress sono:

$$\tau_x^{surface} = c_D \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad \tau_y^{surface} = c_D \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_x^{bottom} = c_B \rho_0 u_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad \tau_y^{bottom} = c_B \rho_0 v_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad (5)$$

dove:

$c_D$  = coefficiente di attrito del vento,

$c_B$  = coefficiente di attrito al fondo,

$\rho_a$  = densità dell'aria,

$(w_x, w_y)$  = componenti del vento,

$(u_L, v_L)$  = velocità dell'acqua nell'ultimo livello.

Le condizioni al contorno prevedono la suddivisione dei bordi del dominio spaziale in bordi aperti e chiusi. Al contorno di mare aperto viene imposto il livello dell'acqua, mentre per i fiumi viene prescritta la portata. Ai bordi chiusi la componente normale della velocità è uguale a zero, mentre la componente tangenziale della velocità è un parametro libero.

La discretizzazione nello spazio delle incognite è stata attuata con il metodo degli elementi finiti parzialmente modificato rispetto alla formulazione classica. Questo approccio si è rivelato necessario per evitare fenomeni di *numerical damping* e *non conservazione della massa* dovuti alla combinazione di uno schema di tipo semi-implicito per la discretizzazione del tempo con il metodo standard degli elementi finiti conosciuto come *Galerkin method*. La differenza fondamentale rispetto alla formulazione originale consiste nel suddividere lo spazio in triangoli (elementi) e nel descrivere i livelli d'acqua  $\zeta$ , i trasporti  $U, V$ , utilizzando funzioni di forma di diverso ordine, lineari nel caso dei livelli mentre, per i trasporti, costanti a ogni passo spaziale (Umgiesser, 2000; Umgiesser *et al.*, 2004).

## 2.2. IL MODELLO DI TRASPORTO E DIFFUSIONE PER SALINITÀ E TEMPERATURA

Per comprendere la capacità di rimescolamento del sistema e l'evoluzione della salinità, della temperatura dell'acqua o di un qualsivoglia tracciante, è stato studiato il comportamento di una sostanza conservativa disciolta in acqua. In un punto qualsiasi del sistema l'evoluzione della concentrazione  $S$  di un tracciante

conservativo è calcolabile applicando il principio di conservazione della massa (Umgiesser, 1997):

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} + \frac{\partial u_l S_l}{\partial x} + \frac{\partial v_l S_l}{\partial y} + \frac{\partial w_l S_l}{\partial z} = \nu_h \left( \frac{\partial^2 S_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_l}{\partial y^2} \right) + \nu_{v,l} \frac{\partial^2 S_l}{\partial z^2} + F \quad (6)$$

dove:

$S_l$  = concentrazione nello strato  $l$ ,

$\nu_h$  e  $\nu_{v,l}$  = coefficienti di diffusione orizzontale e verticale (calcolati dal modello k-E di chiusura della turbolenza),

$F$  = sorgenti esterne

### 2.2.1 Modulo di calore

La temperatura dell'acqua di un bacino varia nello spazio e nel tempo; questo indica che il calore fornito dalla radiazione solare viene assorbito, trasportato dalle correnti e scambiato con l'atmosfera per mezzo di diversi processi, come evaporazione e convezione.

La variazione della temperatura dell'acqua nel tempo è data dall'equazione 6 e gli scambi di calore con l'atmosfera sono contenuti nel termine sorgente  $\varphi = Q/C$  (Zampato *et al.*, 1998).  $C$  è la capacità termica del volume  $V$  di fluido considerato con

$$C = c\rho V$$

$c=4183$  [J/kg K] calore specifico e  $\rho=1000.52$  [kg/m<sup>3</sup>] densità dell'acqua.  $Q$  è il flusso di calore per unità di tempo in W/m<sup>2</sup> scambiato tra l'atmosfera e mare attraverso la superficie marina, che si può scindere nella somma di quattro termini:

$$Q = Q_s + Q_b + Q_e + Q_h \quad (7)$$

I quattro contributi rappresentano altrettanti processi fisici:

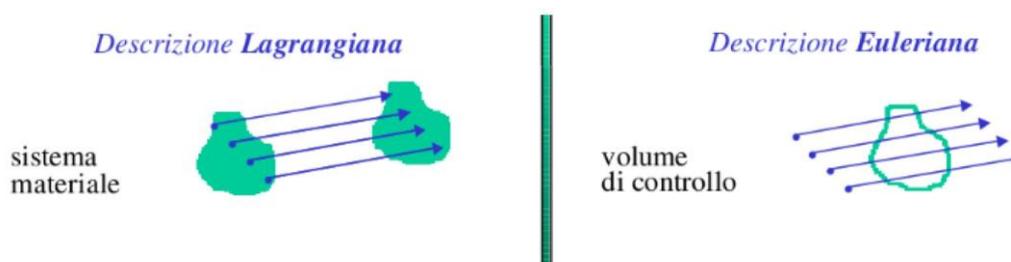
- $Q_s$  è il flusso di energia solare attraverso la superficie del mare (short-wave radiation).  $Q_s$  presenta un'elevata variabilità giornaliera e stagionale: i suoi valori dipendono da lunghezza del giorno, elevazione del sole, assorbimento da parte dell'atmosfera, copertura nuvolosa, riflessione alla superficie;
- $Q_b$  è il flusso netto di calore tra atmosfera e mare, in base alla legge di Stefan-Boltzmann (long-wave radiation): è dato dalla differenza tra il flusso di energia

irraggiato dalla superficie, a temperatura  $T_s$ , proporzionale a  $T_s^4$  dalla legge di Stefan, e il flusso ricevuto dall'atmosfera, a temperatura  $T_a$ , proporzionale a  $T_a^4$ .  $Q_b$  non presenta notevoli variazioni giornaliere o stagionali, né forti variazioni con la latitudine;

- $Q_e$  è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera attraverso i processi di evaporazione e condensazione: è proporzionale al gradiente della concentrazione di vapore acqueo sopra la superficie del mare alla velocità del vento  $W$ ;
- $Q_h$  è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera per conduzione e convezione. Questo termine è proporzionale al gradiente di temperatura nello strato atmosferico sopra la superficie del mare e come  $Q_e$  dipende dalla velocità del vento  $W$ , che è intesa come scala per l'effetto della turbolenza.

### 2.3. I MODELLI DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI

Per lo studio della dispersione del materiale sedimentario sono stati implementati due approcci, uno euleriano e uno lagrangiano. L'approccio lagrangiano identifica un sistema materiale (particella, insieme di particelle, corpo rigido, ecc.) e ne segue gli spostamenti nello spazio; in ogni istante e per ogni punto materiale sono descritti i valori delle grandezze di interesse e la posizione del punto medesimo, ottenendo una completa descrizione spazio-temporale del campo. Nella descrizione Euleriana, viceversa, si identifica un riferimento geometrico (punto, volume) fisso nello spazio, e se ne descrive i valori delle grandezze di interesse in ogni istante; a causa del movimento, però, i diversi valori per i diversi tempi sono riferiti a punti materiali (particelle fluide) diverse (Fig. 2).



**Fig. 2** – Rappresentazione grafica dell'approccio lagrangiano ed euleriano (<http://www.diiar.polimi.it/fanz/MdF/dispense/MdFparteB.pfd>).

Questi due metodi sono complementari: il modello lagrangiano ben si presta alla descrizione della dispersione spaziale dei materiali in sospensione, mentre quello euleriano può fornire indicazioni sia sulla dispersione che sull'accumulo del sedimento depositato nell'area di sversamento.

### 2.3.1 Modello lagrangiano di trasporto dei sedimenti

Il modello idrodinamico SHYFEM è corredato di un modulo lagrangiano che permette di seguire nello spazio i movimenti di singole particelle.

Il moto della singola particella  $k$  viene descritto attraverso la variazione della sua posizione nello spazio. Gli spostamenti  $dX$ ,  $dY$  e  $dZ$  sono quindi dovuti alle velocità di corrente  $u$ ,  $v$ ,  $w$  nelle tre direzioni, alle fluttuazioni turbolente  $u^i$ ,  $v^i$ ,  $w^i$  e ai moti verticali generati dai processi di sprofondamento  $w^b$ :

$$\frac{\partial X_k}{\partial t} = u + u^i \quad (8)$$

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} = v + v^i \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_k}{\partial t} = w + w^i + w^b \quad (10)$$

I campi di corrente  $u$ ,  $v$  e  $w$  vengono forniti dal modello idrodinamico ad ogni intervallo temporale. Le fluttuazioni turbolente,  $u^i$ ,  $v^i$ ,  $w^i$ , vengono calcolate con il metodo Random Walk in funzione del coefficiente di diffusione orizzontale che viene calcolato mediante lo schema di Smagorinsky (1963) secondo la seguente equazione:

$$K_H = K \Delta x^2 \left[ \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

dove  $K$  è un parametro che varia tra 0,2 e 0,4.

In questo studio, dovendo simulare materiale sedimentario, ad ogni particella è stata assegnata una dimensione granulometrica a cui è stata associata una velocità di sprofondamento  $w^b$  appropriata.

### 2.3.2 Modello euleriano di trasporto dei sedimenti

In questo caso la dinamica del materiale in sospensione viene descritto dall'equazione 6. Alla superficie e al fondo le condizioni di contorno dell'equazione 6 per i sedimenti sono:

$$+\nu_{v,top} \frac{\partial S_{top}}{\partial z} + w_s S_{top} = FS \quad z=\text{superficie del primo livello} \quad (12)$$

$$-\nu_{v,bot} \frac{\partial S_{bot}}{\partial z} + w_s S_{bot} = ED \quad z=\text{fondo dell'ultimo livello}$$

dove  $FS$  è la quantità di sedimento sversata in superficie ed  $ED$  è il flusso netto di sedimento tra fondale marino e colonna d'acqua, calcolato come differenza tra deposizione e risospensione. Tale termine viene calcolato dal modello Sed-trans05 (Neumeier *et al.*, 2008).

Sedtrans05 non solo calcola i parametri dello strato limite, ma predice anche lo sviluppo delle forme di fondo e i tassi di trasporto solido, sia come carico di fondo sia in sospensione, per sabbie e sedimenti coesivi. Il modello matematico Sedtrans05 può essere usato per predire il tasso di trasporto e la direzione di sabbia o fango in condizioni di corrente stazionaria oppure onde e correnti combinate, al di fuori della zona di frangenza delle onde. Sedtrans05 adotta la teoria di Grant e Madsen (1986) dello strato limite al fondo per calcolare la velocità di taglio al fondo e il profilo di velocità.

### **3. APPLICAZIONE DEL MODELLO**

#### **3.1. LA GRIGLIA DI CALCOLO**

Il modello ad elementi finiti deve essere supportato da una griglia a struttura irregolare su cui far avvenire la simulazione. I file di griglia sono strutturati in modo da poter rappresentare in un piano cartesiano la struttura geometrica e la batimetria di un dato bacino attraverso punti, detti nodi, linee ed elementi triangolari variabili per dimensioni e forma. Il file di griglia è composto da due matrici consecutive, una che definisce i nodi e l'altra gli elementi tramite numero, coordinate e tipologia.

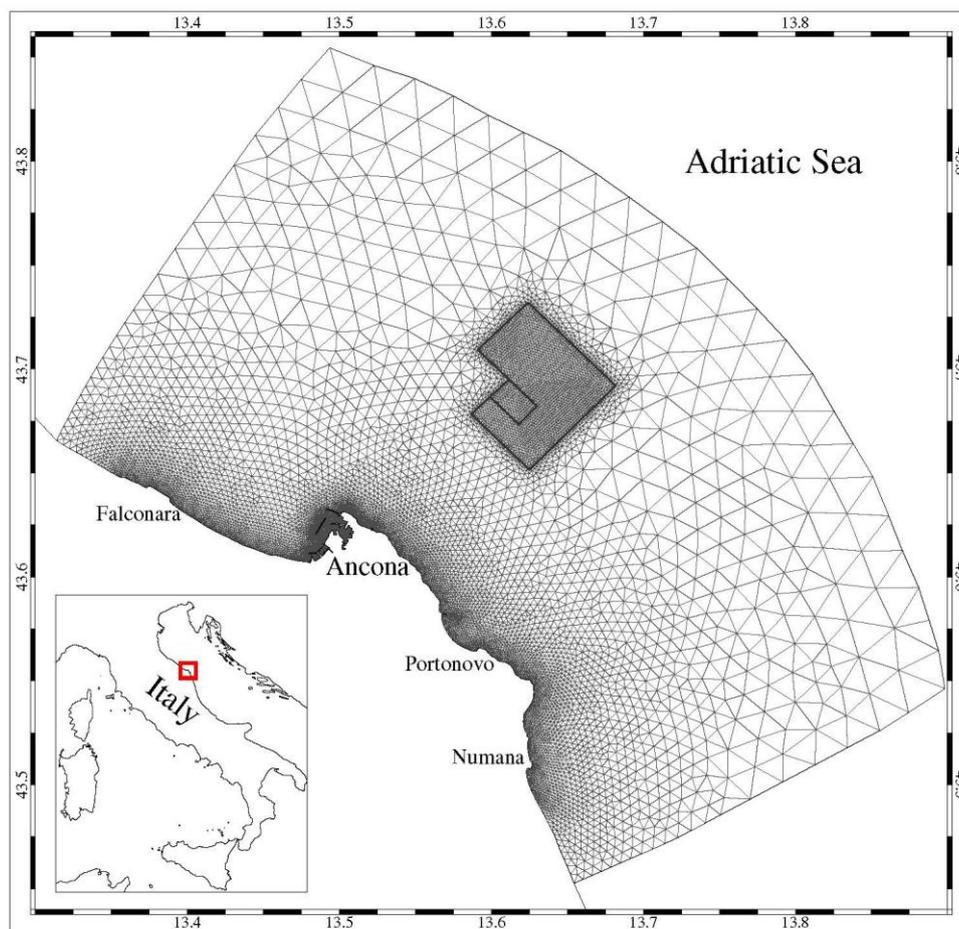
La griglia di calcolo utilizzata in questo studio rappresenta una parte della costa marchigiana (circa da Senigallia a Civitanova Marche) che comprende il porto di Ancona e si estende verso mare fino alla batimetria dei 55 m (circa 20-25 km dalla costa). La griglia di calcolo è stata ottenuta suddividendo l'area di interesse in 27036 elementi triangolari per descrivere la geometria della costa e nel dettaglio la zona portuale. Grazie alla differente dimensione degli elementi è stato possibile aumentare la risoluzione nella zona portuale fino a poche decine di metri. Nella zona di sversamento la risoluzione della griglia è di circa 150 m.

La griglia numerica di calcolo è mostrata in Fig. 3.

Sugli elementi della griglia di calcolo è stata interpolata la batimetria della zona ottenuta dall'unione dei seguenti dataset:

- rilievo del fondale della zona del porto di Ancona eseguita dall'Istituto Idrografico della marina nel 2011;
- rilievo del fondale della Baia di Mezzavalle eseguito dal CNR-ISMAR UOS Ancona nel 2003;
- batimetria del mare Adriatico tramite il portale EMODnet (European Marine Observation and Data Network) e di proprietà del CNR-ISMAR (Trincardi *et al.*, 2013).

La batimetria così ottenuta è mostrata in Fig. 4 con sovrapposta la griglia di calcolo.



**Fig. 3** - Griglia computazionale agli elementi finiti utilizzata in questo studio. Il poligono grigio nella zona a mare indica la zona predisposta allo sversamento dei sedimenti dragati.

### **3.2. SET-UP DELLE SIMULAZIONI**

Al fine di descrivere la circolazione idrodinamica la dispersione dei sedimenti nella zona costiera antistante la zona portuale di Ancona è stata effettuata una simulazione annuale per l'anno 2014.

E' stato applicato il modello SHYFEM nella versione tridimensionale con il contributo dei termini baroclini al fine di descrivere il campo di corrente, di salinità e temperatura dell'acqua. La colonna d'acqua è stata suddivisa in 18 livelli verticali aventi spessore variabile (da 1 m in superficie a 10 m nella parte più profonda). Le condizioni al contorno sono fornite da una applicazione del modello SHYFEM a tutto l'Adriatico. Tale modello a scala maggiore fornisce le informazioni relative al livello del mare, alla struttura tridimensionale delle velocità della corrente, della salinità e della temperatura del mare. Il modello viene forzato alla superficie del mare dai campi di vento, pressione atmosferica, pioggia e flussi di calore ottenuti dal modello meteorologico MOLOCH del CNR-ISAC avente una risoluzione spaziale di 1,55 km.

In questo studio il coefficiente di attrito è stato considerato costante su tutto il bacino e uguale a un valore di  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Il coefficiente di attrito per il vento è stato settato a un valore di  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Tali valori sono conformi a quelli adottati in simili studi (Bellafiore *et al.*, 2008; Ferrarin *et al.*, 2010).

La composizione granulometrica dei sedimenti risospesi considerata in questo studio è:

- argilla, 7,5%;
- silt, 66,5%;
- sabbie fini: 26,0%.

### 3.3. VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO

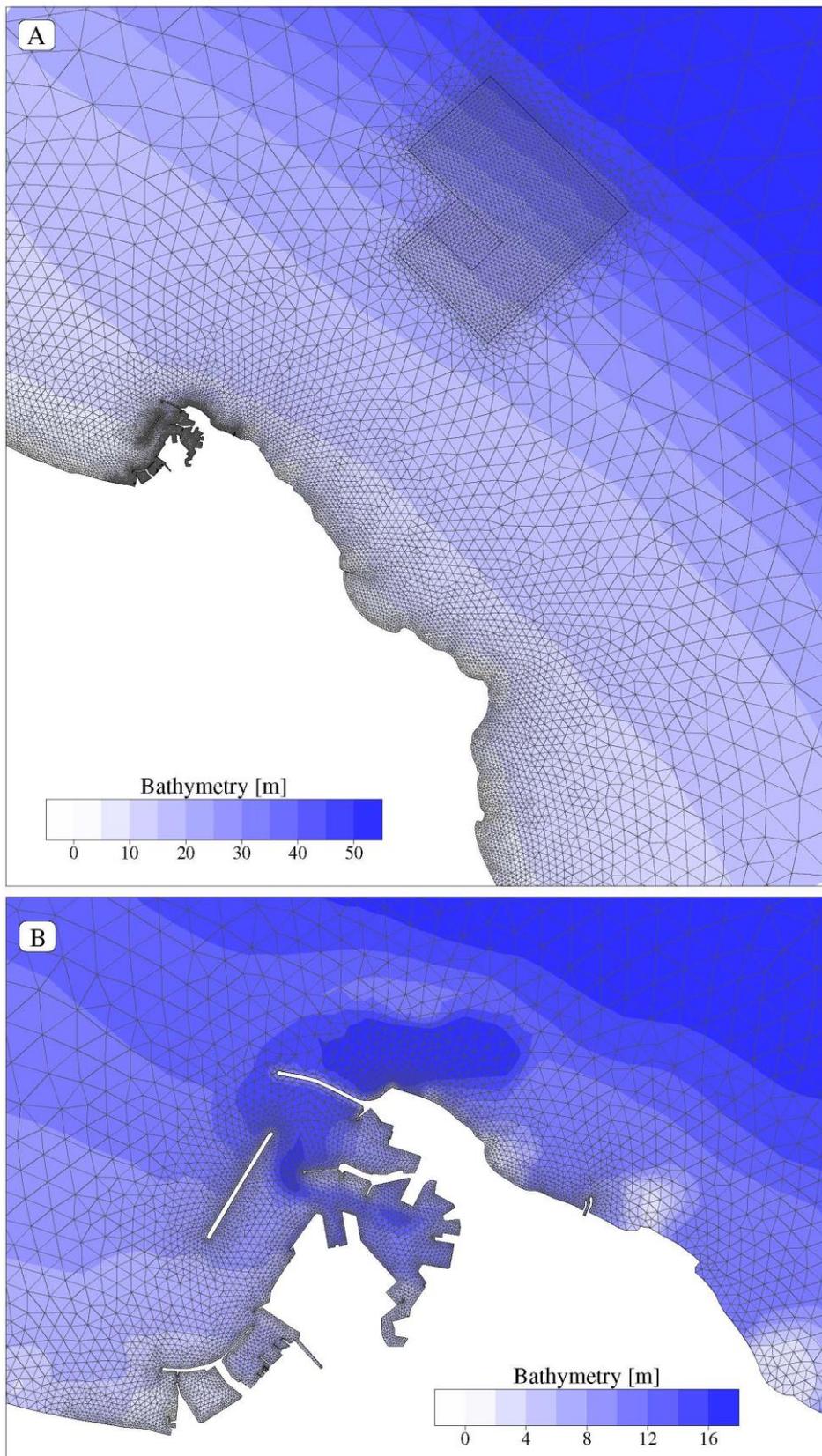
Allo stato attuale le uniche misure disponibili per la validazione del modello idrodinamico sono le osservazioni del livello del mare registrate nel porto di Ancona dal mareografo delle Rete Mareografica Nazionale. In corrispondenza del mareografo sono stati estratti i valori di livello del mare simulati dal modello matematico.

Al fine di valutare la capacità del modello nel riprodurre la dinamica mareale è stata effettuata l'analisi armonica sia dalle misure che dai risultati del modello. Dai risultati dell'analisi armonica riportati in Tab. 1 si evidenzia che il modello ben riproduce il segnale mareale nella zona di interesse e che sovrastima le componenti semidiurne e sottostima quelle diurne.

Una più accurata validazione del modello idrodinamico verrà effettuata utilizzando i dati sperimentali acquisiti nel corso del progetto.

Tab. 1 - Ampiezze delle principali componenti armoniche semi-diurne della marea ottenute dalle misure e dalle simulazioni numeriche per l'anno 2014 ad Ancona. Vengono anche riportate le differenze tra modello e misure. I valori sono espressi in cm.

Costante armonica	Obs	Mod	Diff
M2	6.55	7.07	0.52
S2	3.56	3.92	0.36
N2	1.20	1.30	0.10
K2	1.06	1.26	0.18
K1	12.45	12.40	-0.05
O1	4.26	3.84	-0.42
P1	4.29	4.10	-0.19



**Fig. 4** - Batimetria della zona di interesse (A) e particolare della zona portuale di Ancona (B). La batimetria è sovrapposta alla griglia di calcolo.

#### **4. DESCRIZIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRODINAMICA E INDIVIDUAZIONE DEGLI SCENARI METEOMARINI**

I risultati della simulazione idrodinamica sono stati analizzati al fine di caratterizzare la circolazione nella zona di interesse. Come prima analisi sono stati estratti i valori di velocità della corrente in due punti del dominio di calcolo:

- **A** - all'interno dell'area di sversamento;
- **B** - nella zona di escavo a ridosso del molo.

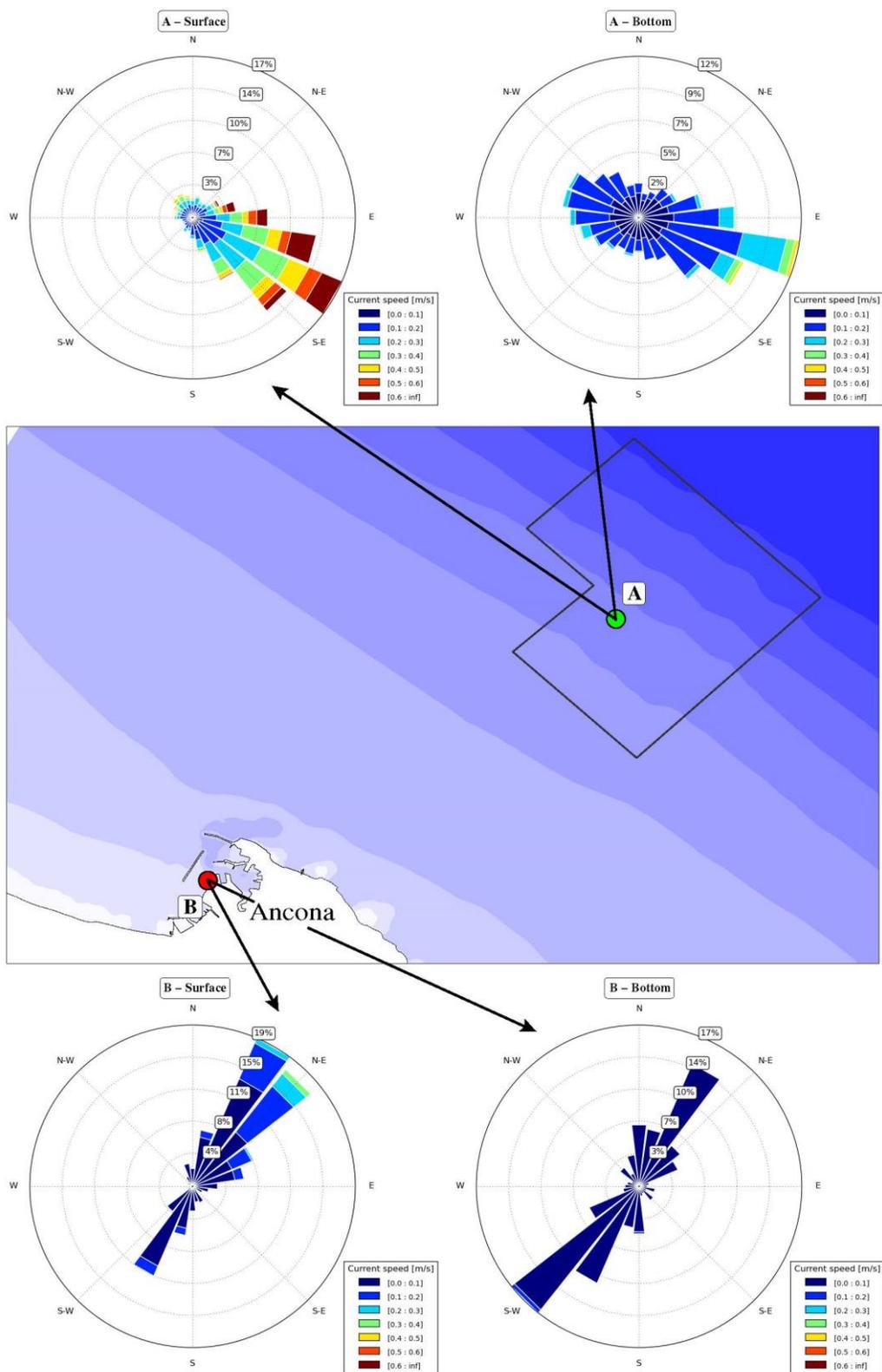
L'ubicazione dei due siti selezionati assieme ai grafici della velocità della corrente (sia in superficie che al fondo) sono mostrati in Fig. 5.

La corrente nella zona di sversamento è chiaramente caratterizzata da direzione di propagazione verso est-sud-est con intensità che superano i  $60 \text{ cm s}^{-1}$ . Tali risultati corrispondono alle osservazioni di Budillon *et al.* (2002) e confermano il ruolo predominante della corrente proveniente da nord-ovest alimentata dalle acque dolci del Po e degli altri fiumi del Nord Adriatico. Ne consegue che l'intensità di questa corrente è funzione della quantità di acqua dolce sversata in Nord Adriatico e dalle condizioni di stratificazione della colonna d'acqua.

Anche al fondo si riscontra una corrente prevalente avente direzione di propagazione est-sud-est, sebbene con intensità inferiore a quella in superficie. Da notare inoltre l'effetto più marcato al fondo della corrente, di modesta intensità, generata dalla marea identificabile da una circolazione anche in direzioni ovest-nord-ovest. L'orientamento di questi due regimi di corrente generati dalla marea corrisponde alle ellissi mareali delle principali costanti armoniche presentate da Budillon *et al.* (2002).

Nella zona di escavo la corrente in superficie è caratterizzata da una direzione di propagazione prevalente verso nord-est e risulta ovviamente allineata alla morfologia dei moli del porto. In superficie la corrente raggiunge raramente intensità superiori a  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Al fondo è evidente l'effetto della corrente di marea che genera una circolazione anche verso sud-ovest.

Rispetto a questi andamenti predominanti bisogna tenere presente che l'effetto locale del vento può modificare in modo significativo la dinamica della corrente superficiale. Al fine di identificare un insieme di scenari meteo-marini caratteristici è stato quindi analizzato il vento utilizzato per forzare il modello idrodinamico. Il diagramma del vento del modello meteorologico MOLOCH estratto in un sito a circa 10 km al largo del Porto di Ancona viene mostrato in Fig. 6.



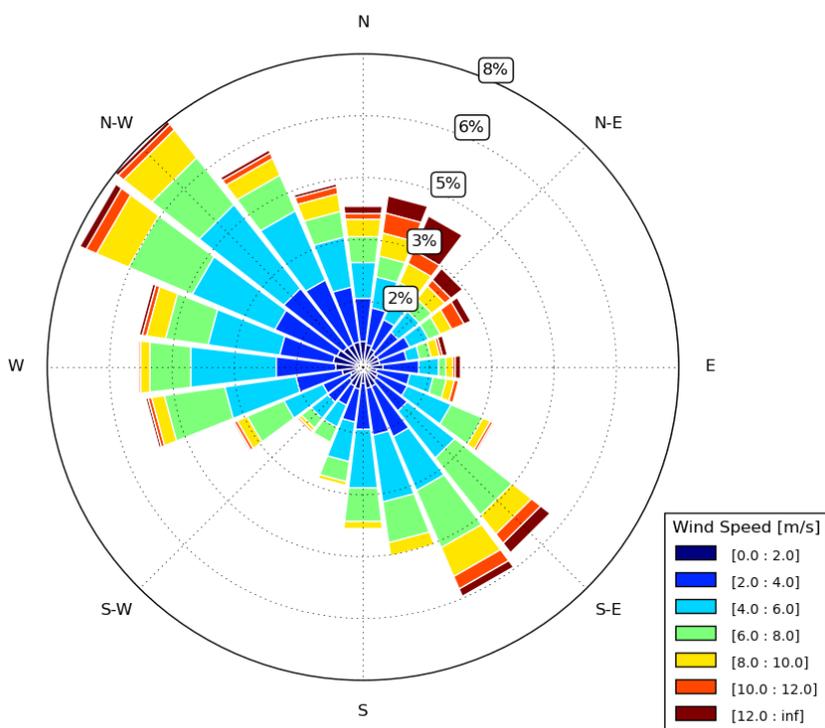
**Fig. 5** - Diagrammi della direzione e intensità della corrente estratta dai risultati modellistici alla superficie e al fondo in due punti del dominio di calcolo: A = nell'area di sversamento, B = nella zona di escavo.

Dalla

Si possono identificare tre regimi di vento predominanti e quindi determinare quattro scenari meteo-marini:

- S1 - calma di vento;
- S2 - vento di Bora (da nord-nord-est);
- S3 - vento di Scirocco (da sud-est);
- S4 - vento di Maestrale (da nord-ovest).

Non essendo possibile creare degli scenari sintetici, data la complessità della circolazione nella zona di indagine, per ognuno di questi regimi di vento è stato individuato un evento caratteristico nel 2014 per cui viene investigata la dispersione del materiale sedimentario.



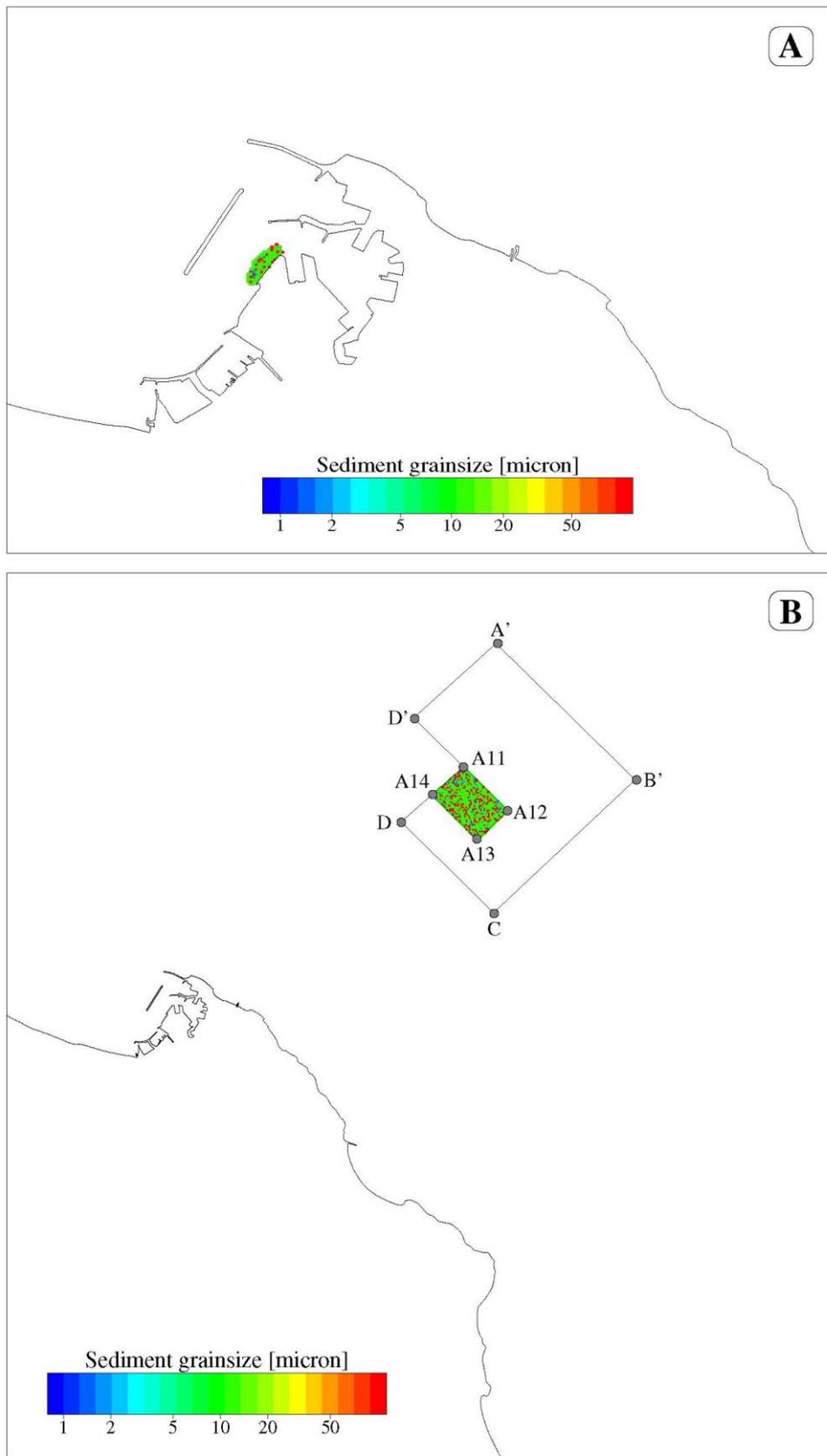
**Fig. 6** - Rosa dei venti estratti dal modello meteorologico MOLOCH in un sito a circa 10 km al largo del porto di Ancona. I dati sono rappresentati per direzione di provenienza.

## **5. SCENARI DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI**

Il modello lagrangiano è stato utilizzato per descrivere la possibile dispersione dei sedimenti marini sia nella zona di escavo che nell'area di sversamento a mare.

Si fa notare che viene qui simulata solo la plume di dispersione dei sedimenti messi in sospensione durante i lavori. Per quanto riguarda le operazioni di sversamento non viene quindi rappresentata la dinamica dei sedimenti che dalla nave depositano compatti al fondo, ma solo la dispersione di quella parte di granuli di sedimenti che vengono messi in sospensione. Tale quantità di materiale, che forma la plume di dispersione, può avere concentrazioni varie che dipendono dalla tipologia del materiale stesso e dalle modalità di sversamento. Non essendo presenti dati sito-specifici relativi alla concentrazione dei sedimenti nelle vicinanze dello sversamento, non è stato possibile associare alle particelle lagrangiane una quantità di massa di sedimento corrispondente. Comunque la metodologia utilizzata, tramite la simulazione di particelle lagrangiane, ben si presta a descrivere la dinamica del materiale in sospensione, indipendentemente dalla quantità di sedimento effettivamente sospeso.

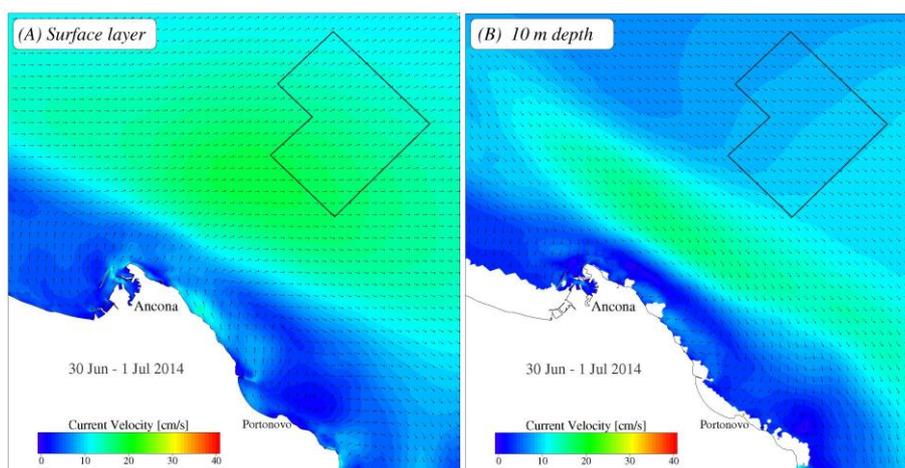
La distribuzione delle particelle rilasciate viene mostrata in Fig. 7. Il colore dei traccianti lagrangiani rappresenta la dimensione delle particelle di sedimento. Per simulare la dispersione del sedimento durante la fase di escavo vengono rilasciate le particelle in un'area del porto a ridosso del molo (Fig. 7A). Per simulare la dispersione del sedimento durante la fase di sversamento vengono rilasciate le particelle nell'area identificata dai punti A11, A12, A13 e A14 in Fig. 7B. Nella zona di escavo il modello rilascia 1000 particelle all'ora dalle ore 7 alle ore 19 del giorno selezionato lungo tutta la colonna d'acqua. Nell'area di sversamento vengono rilasciate 1000 particelle ogni 4 ore dalle ore 9 alle ore 18 del giorno selezionato solamente nello strato superficiale (3 sversamenti al giorno).



**Fig. 7** - Distribuzione delle particelle lagrangiane rilasciate nella zona di escavo (A) e nell'area di sversamento (B). Il colore indica la dimensione granulometrica delle particelle di sedimento.

### 5.1. SCENARIO 1 - CALMA DI VENTO

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 30/06 - 02/07/2014. La dinamica della circolazione è rappresentata in Fig. 8 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 8** - Scenario S1. Correnti medie nel periodo 30/06 - 01/07/2014 in superficie (A) e sul fondo (B).

In assenza di vento la circolazione è dominata dalla corrente costiera e modulata dalla marea. In media, la circolazione nella zona di sversamento in superficie (Fig. 8A) ha direzione est nord-est con intensità di circa  $20 \text{ cm s}^{-1}$ . Al fondo la corrente ha direzione da nord-ovest a sud-est con intensità di circa  $10 \text{ cm s}^{-1}$ .

La dispersione dei sedimenti in questo scenario viene presentata in Fig. 9 a diversi istanti temporali: dopo 2, 11, e 41 ore dall'inizio delle operazioni di escavo e sversamento. In generale si osserva che, ovviamente, i sedimenti più grossolani depositano in prossimità della zona di lavoro, mentre sedimenti più fini vengono trasportati dalle correnti marine. La maggior parte dei sedimenti siltosi risospesi durante le operazioni di dragaggio rimangono nella zona portuale, e una parte di essi viene trasportata al di fuori del porto verso sud. I sedimenti argillosi vengono facilmente tenuti in sospensione dalle correnti e trasportati verso sud.

Per quanto riguarda la zona di sversamento si può notare che la predominante corrente verso est sud-est fa sì che i sedimenti siltosi depositino leggermente a sud-est dell'area designata allo scarico. I sedimenti argillosi risospesi durante le fasi di sversamento vengono facilmente trasportati verso sud parallelamente alla costa e depositano oltre la batimetrica dei 15 m.

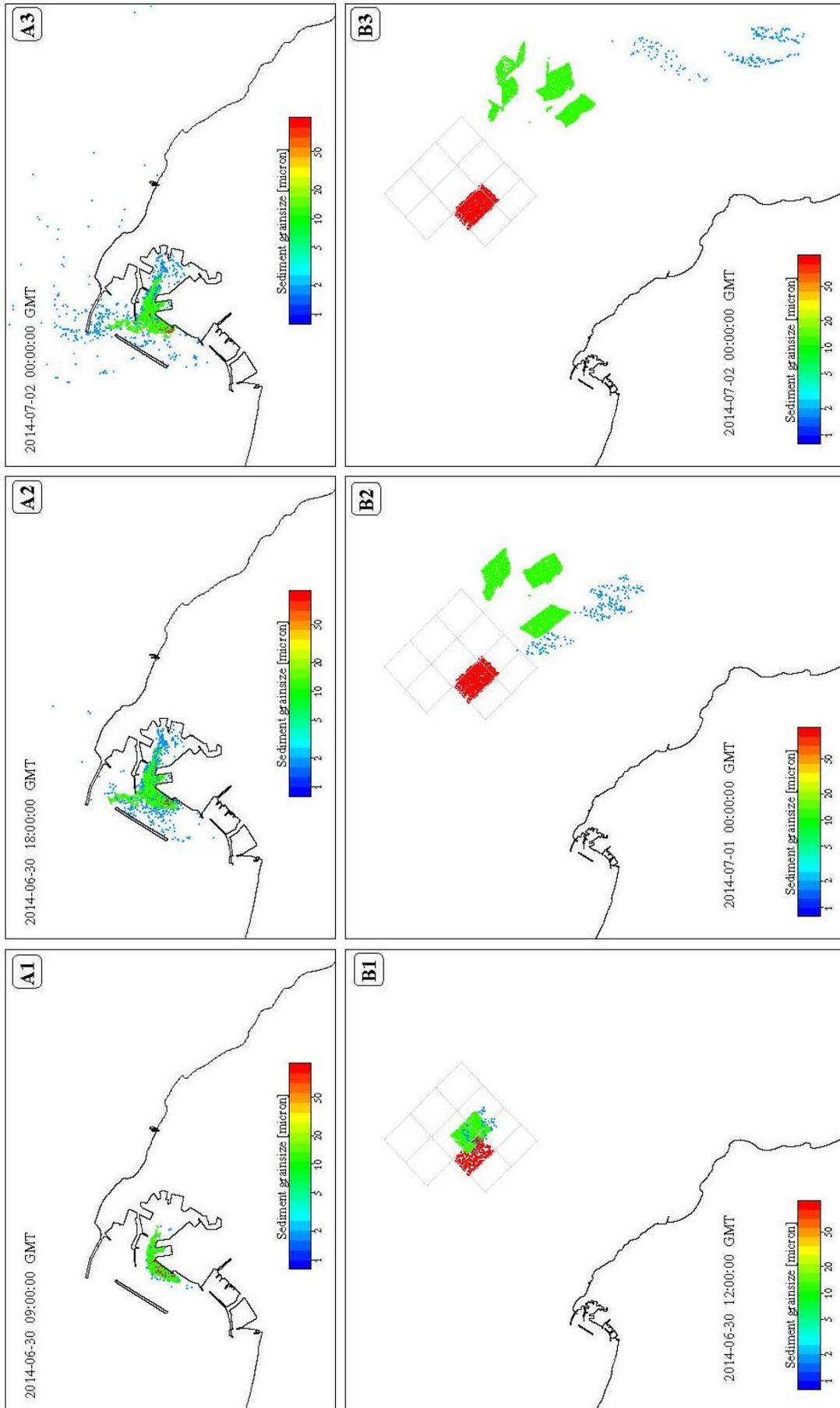
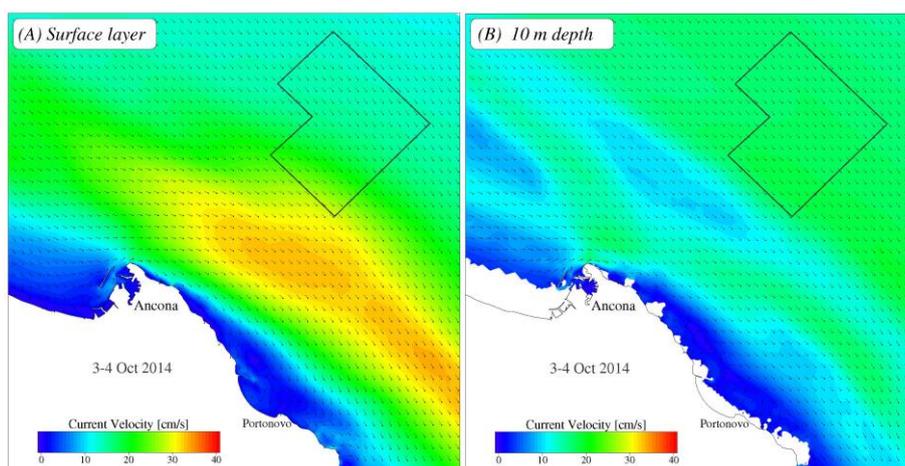


Fig. 9 - Scenario S1. Mappe di distribuzione delle particelle lagrangiane nella zona portuale (A1-A3) e nell'area di sversamento (B1-B3) a diversi istanti temporali.

## 5.2. SCENARIO 2 - VENTO DI BORA

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 03-04/10/2014. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 10 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 10** - Come la Fig. 8 ma per lo scenario S2. Correnti medie sul periodo 03-04/10/2014.

Durante questo scenario le correnti superficiali hanno in media direzione verso sud-est e intensità che raggiungono i  $30 \text{ cm s}^{-1}$ . Anche a 10 m di profondità le correnti hanno direzione prevalente verso sud-est.

Tale struttura di circolazione fa sì che i sedimenti risospesi siano trasportati con maggiore dinamismo rispetto lo scenari S1 (Fig. 11). I sedimenti sabbiosi e siltosi depositano quasi esclusivamente nella zona di escavo, mentre parte dei sedimenti fini vengono trasportati fuori dal porto verso sud in mare aperto.

Nell'area di sversamento si può notare che i sedimenti siltosi creano una plume che si estende verso sud-est e depositano al di fuori della zona di rilascio. I sedimenti argillosi vengono totalmente trasportati verso sud-est al di fuori del dominio di calcolo.

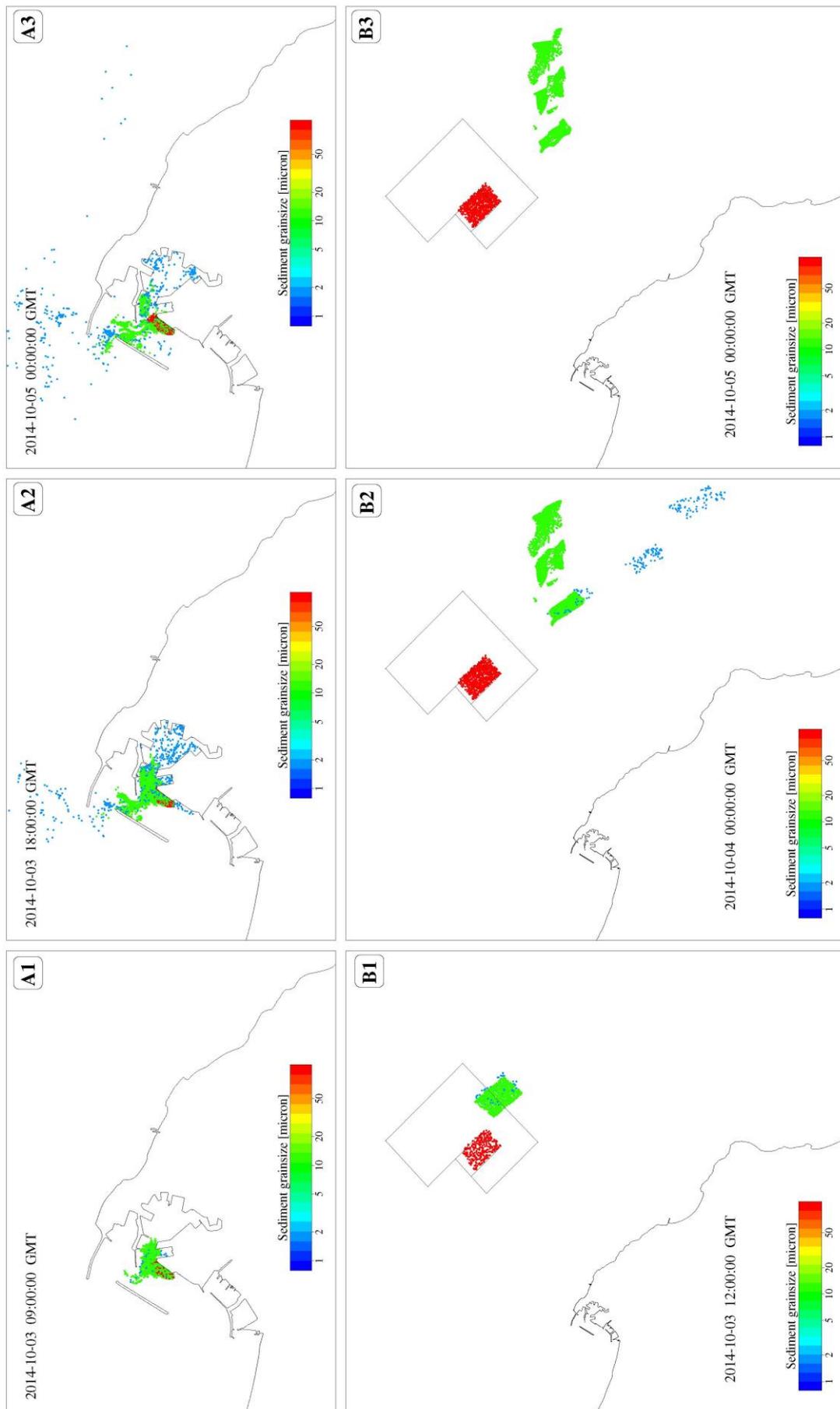
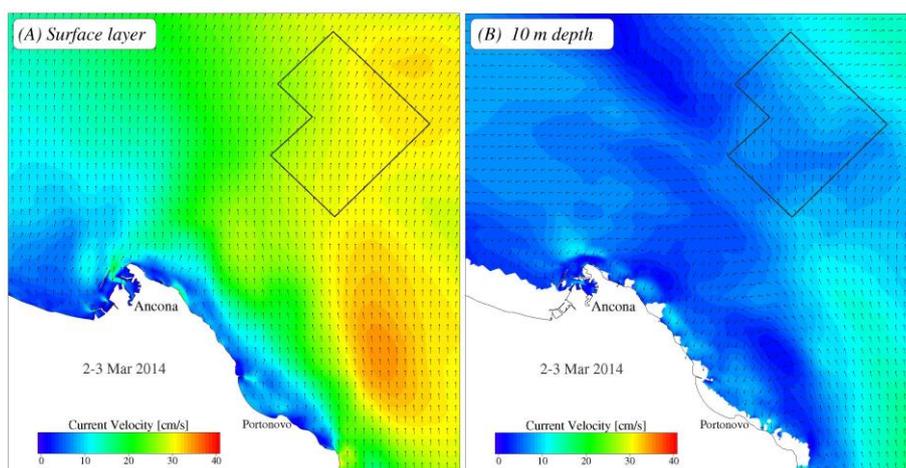


Fig. 11 - Come la Fig. 9 ma per lo scenario S2.

### 5.3. SCENARIO 3 - VENTO DI SCIROCCO

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 02-03/03/2014. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 12 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 12** - Come la Fig. 8 ma per lo scenario S3. Correnti medie sul periodo 02-03/03/2014.

Le correnti medie superficiali create dal vento di Scirocco sono generalmente dirette verso nord, con intensità nell'ordine dei  $15-25 \text{ cm s}^{-1}$ . Al fondo sono presenti correnti medie deboli con una non ben definita struttura e nella zona di sversamento sono dirette verso ovest-sud-ovest.

La dispersione dei sedimenti in questo scenario viene mostrata in Fig. 13.

Parte dei sedimenti fini risospesi nella zona di escavo vengono trasportati al di fuori dell'area portuale e tendono a depositare nella zona di mare aperto tra la città di Ancona e l'area di sversamento. I sedimenti fini in sospensione nella zona di sversamento tendono a formare una plume direzionata verso nord-est e quindi a essere trasportati verso il mare aperto.

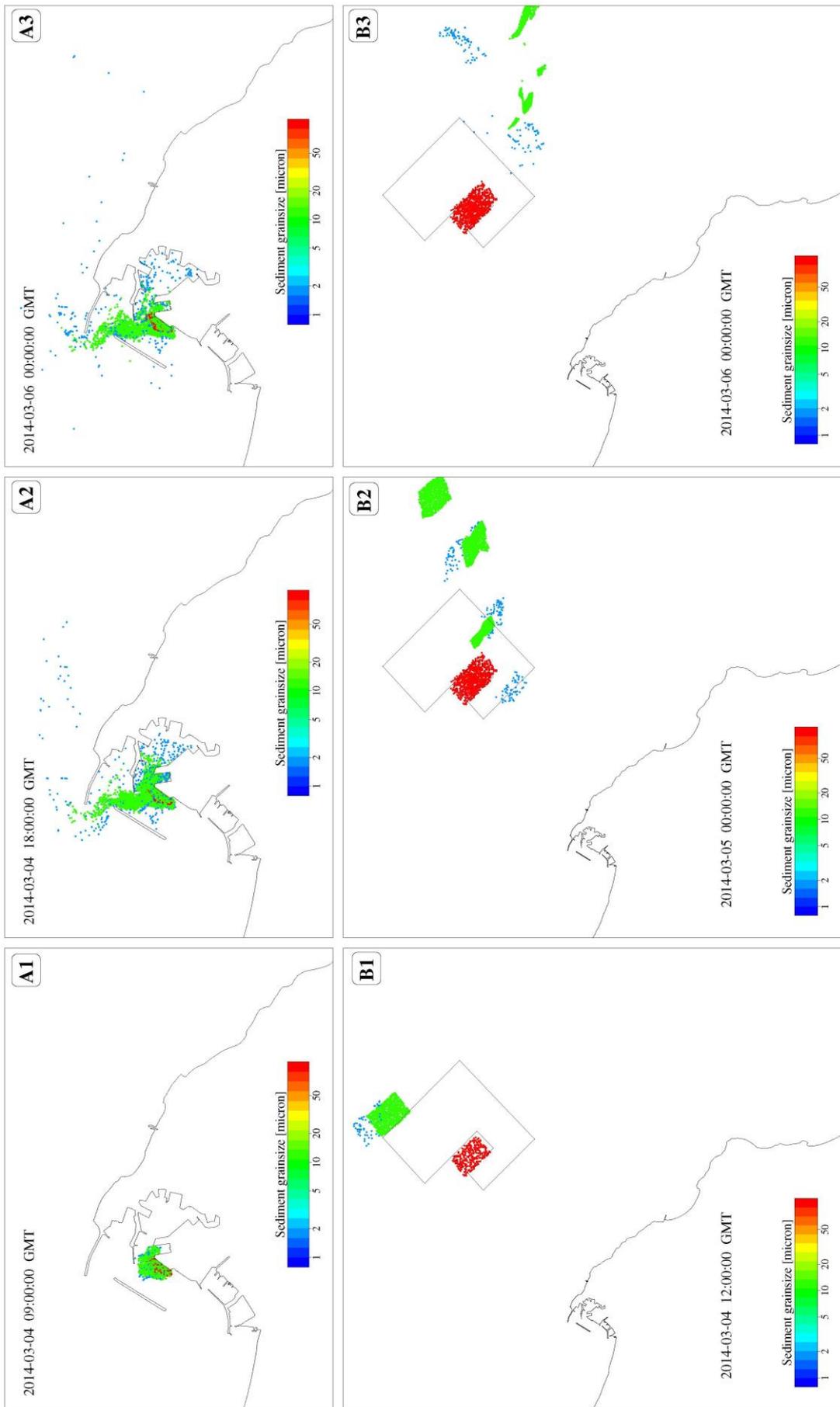
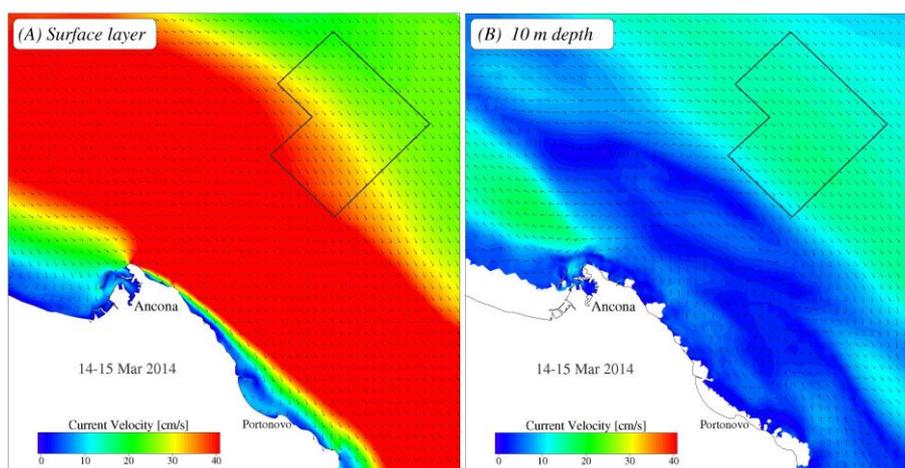


Fig. 13 - Come la Fig. 9 ma per lo scenario S3.

#### 5.4. SCENARIO 4 - VENTO DI MAESTRALE

Per questo scenario è stata effettuata una simulazione con traccianti lagrangiani per il periodo 14-15/03/2014. La dinamica della circolazione viene rappresentata in Fig. 14 dalle mappe della corrente media dei primi due giorni di simulazione.



**Fig. 14** - Come la Fig. 8 ma per lo scenario S4. Correnti medie sul periodo 14-15/03/2014.

Nel periodo selezionato di evidenzia una forte corrente superficiale che interessa tutta la zona costiera con direzione media di propagazione verso sud-est e intensità di circa  $40 \text{ cm s}^{-1}$ . Nella zona a ridosso dei moli portuali la corrente media è orientata verso sud. A 10 m di profondità la struttura della corrente è più complessa, presentando direzione nord-ovest nella parte più prossima alla costa e sud-est in mare aperto. Nella zona intermedia sono evidenti alcune strutture di ricircolazione.

In questo scenario i sedimenti fini risospesi durante le operazioni di escavo rimangono principalmente nell'area portuale, ma parte di essi viene trasportata fuori dal porto sia verso sud che verso nord (Fig. 15 A1-A3).

Nella zona di sversamento i sedimenti vengono trasportati verso sud-est negli strati superficiali e in direzione contraria dalle correnti più profonde. Ne risulta che i sedimenti sabbiosi e siltosi tendono a depositare nei pressi della zona di sversamento (Fig. 15 B1-B3). I sedimenti argillosi vengono trasportati generalmente verso sud-est rimanendo comunque distanti dalla costa.

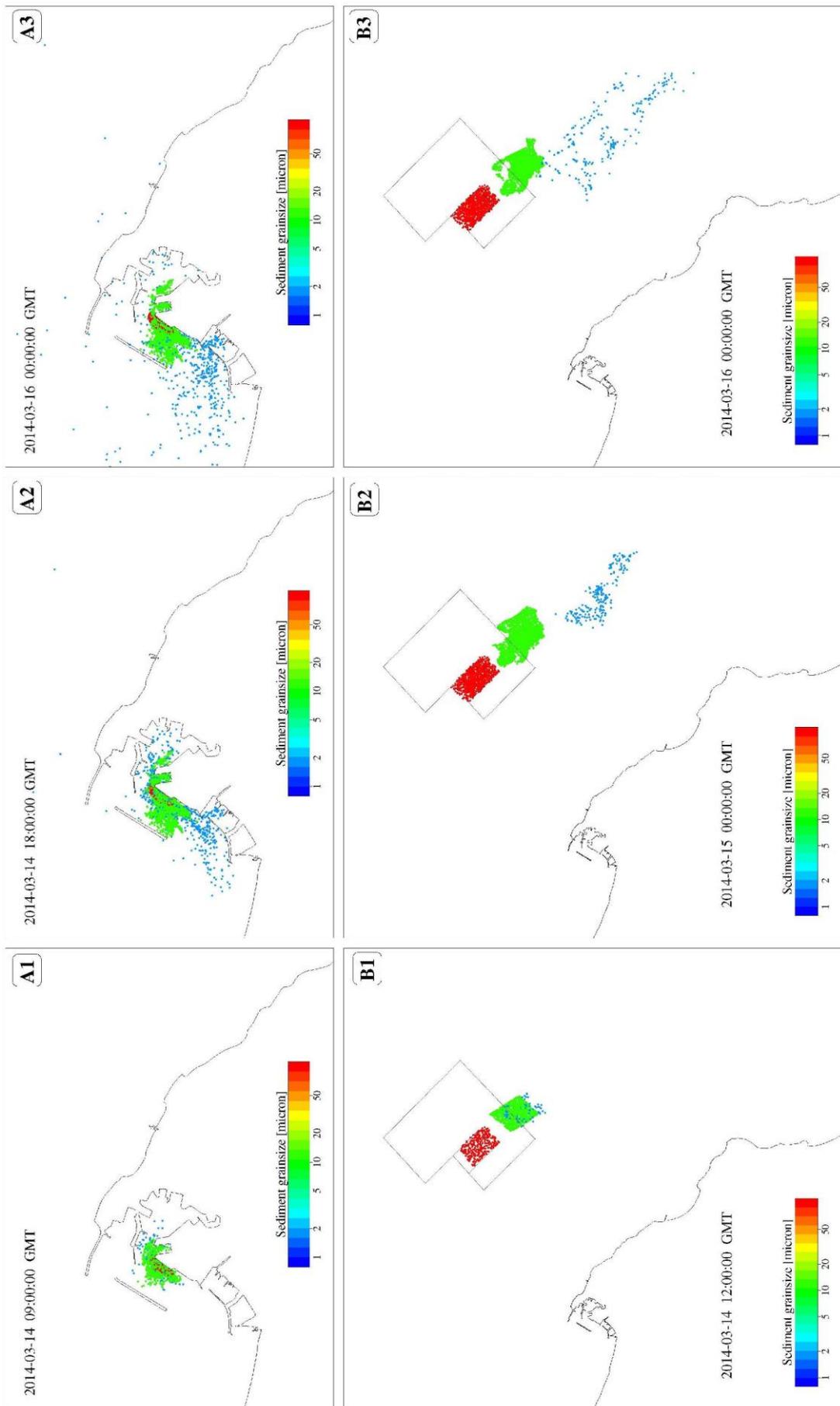


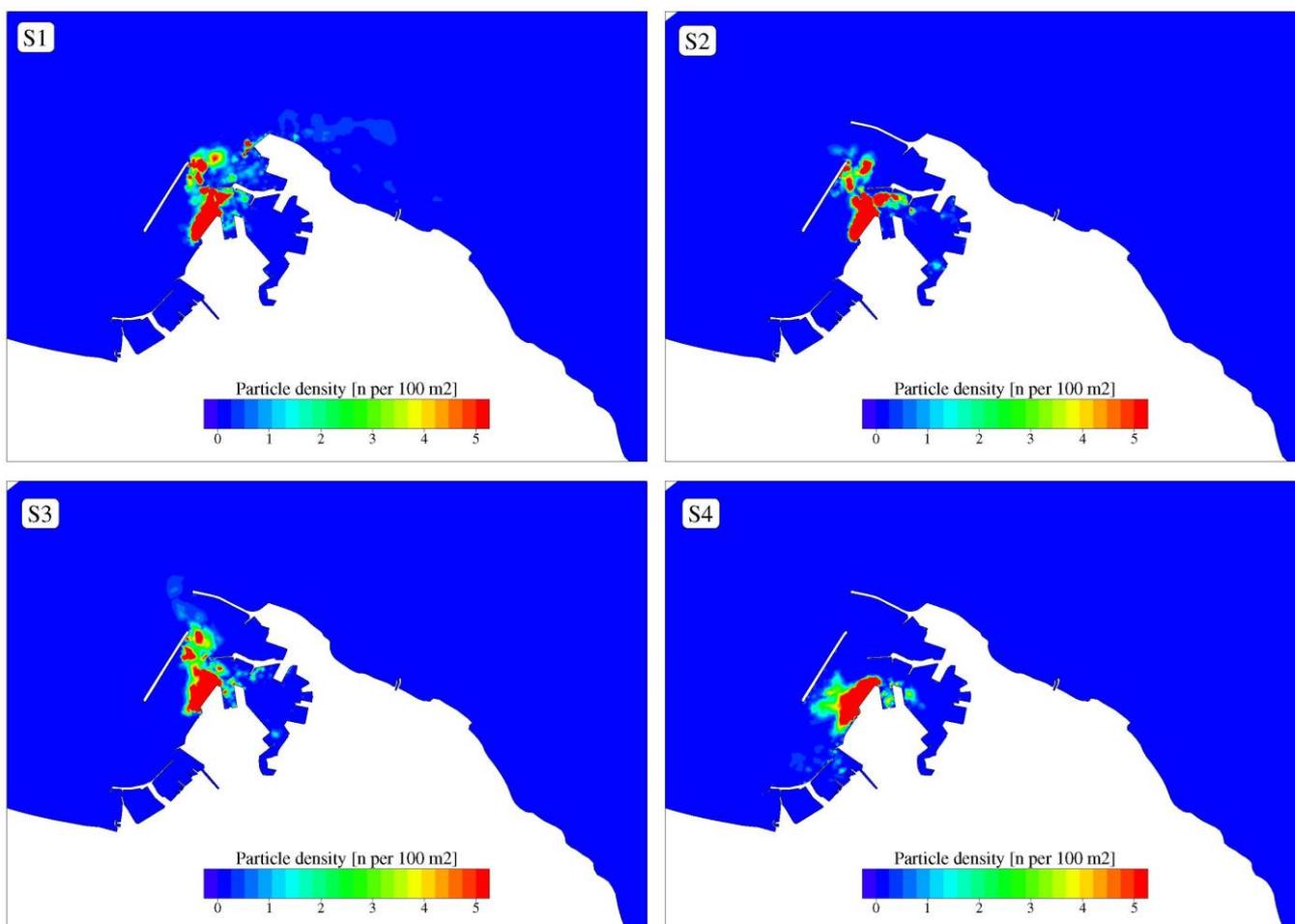
Fig. 15 - Come la Fig. 9 ma per lo scenario S4.

## 6. CONCLUSIONI

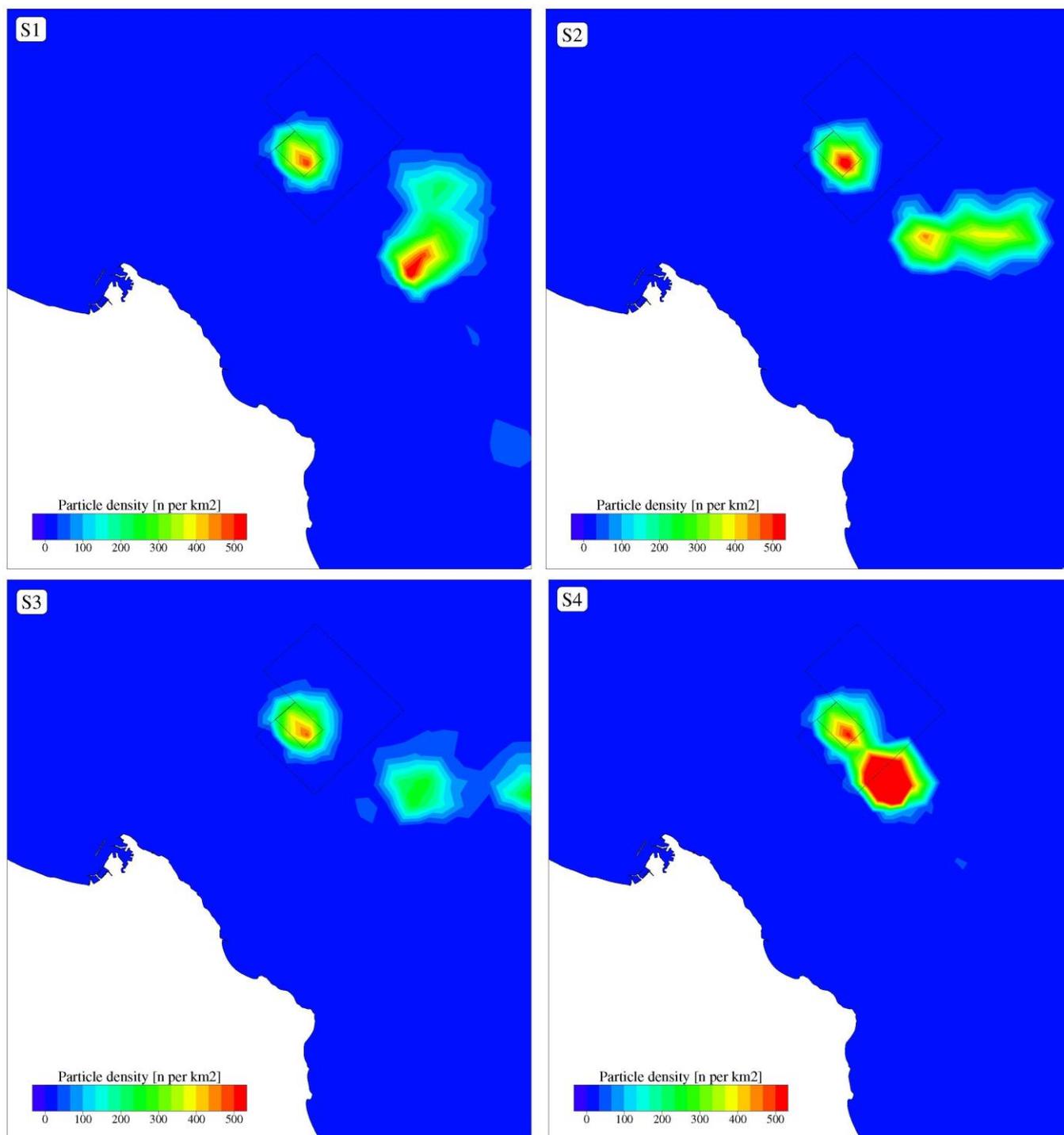
In questo primo rapporto tecnico abbiamo dimostrato che gli strumenti modellistici applicati sono idonei per descrivere la potenziale dispersione del materiale sedimentario risospeso durante i lavori di escavo nel porto di Ancona e di sversamento in mare aperto.

In tutti gli scenari analizzati non è stata evidenziata la deposizione del materiale sedimentario lungo la costa del Promontorio del Conero.

Per una più chiara descrizione della distribuzione spaziale del materiale sedimentario depositato sono state calcolate le concentrazioni di particelle presenti in ogni punto della griglia di calcolo (Figg. 16 e 17).



**Fig. 16** - Densità di particelle lagrangiane (esprese come numero di particelle su  $100 \text{ m}^2$ ) risospese nella zona di escavo. La mappa mostra la situazione alla fine della simulazione, quando le particelle erano tutte depositate al fondo.



**Fig. 17** - Come la Fig. 16 ma per la zona di sversamento. La densità è espressa come numero di particelle su km<sup>2</sup>.

Le particelle di sedimento tendono in gran parte a depositare nelle vicinanze della zona di escavo (Fig. 16). Nella zona di sversamento una parte delle particelle tende a depositare all'interno della zona selezionata e parte deposita a sud-est della

stessa (Fig. 17).

Il modello idrodinamico verrà nei prossimi mesi ulteriormente calibrato e validato con le misure raccolte in situ. Conseguentemente i risultati presentati in questo primo rapporto tecnico sono da considerare preliminari e verranno perfezionati nel corso dello studio.

Tramite l'utilizzo del modello euleriano di trasporto di sedimenti, validato con le misure acquisite, nelle prossime fasi dello studio modellistico si cercherà inoltre di stimare lo spessore del materiale sedimentato al fondo.

## 7. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bellafiore, D., 2009. *Study of the circulation processes in the northern Adriatic sea - coastal area and Venice lagoon inlets*. Ph.D. thesis. University of Bologna, Department of Geophysics. Bologna, IT.
- Bellafiore, D., Umgiesser, G., 2010. Hydrodynamic coastal processes in the North Adriatic investigated with a 3D finite element model. *Ocean Dyn.* 60, 255–273.
- Bellafiore, D., Umgiesser, G., Cucco, A., 2008. Modelling the water exchanges between the Venice Lagoon and the Adriatic Sea. *Ocean Dyn.* 58, 397–413.
- Bergamasco, A., Oguz, T., Malanotte-Rizzoli, P., 1999. Modeling dense water formation and winter circulation in the northern and central Adriatic Sea. *J. Mar. Syst.* 20, 279–300.
- Blumberg, A., Mellor, G.L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Pages 1–16, in: Heaps N.S. (Ed.), *Three-Dimensional Coastal Ocean Models*. AGU, Washington, DC.
- Brown, J.M., Souza, A.J., Wolf, J., 2010. An 11-year validation of wave- surge modelling in the Irish Sea, using a nested POLCOMS-WAM modelling system. *Ocean Model.* 33, 118–128.
- Budillon, G., Grilli, F., Ortona, A., Russo, A., Tramontin, M., 2002. An Assessment of Surface Dynamics Observed Offshore Ancona with HF Radar. *Mar. Ecol.* 23, 21–37.
- Burchard, H., Petersen, O., 1999. Models of turbulence in the marine environment - a comparative study of two equation turbulence models. *J. Mar. Syst.* 21, 29–53.
- Crise, A., Cavazzon, F., Malačić, V., Querin, S., 2003. Circolazione Indotta dal Vento di Bora nel Golfo di Trieste: Studio Numerico in Condizioni di Stratificazione. in: La difesa idraulica del territorio 2003.
- Cushman-Roisin, B., Korotenko, K., Dietrich, D.E., 2005. Simulation and Characterization of the Adriatic Sea Mesoscale Variability. *J. Geoph. Res. - Oceans Special Adriatic Sea Issue*.
- Ferrarin, C., Cucco, A., Umgiesser, G., Bellafiore, D., Amos, C.L., 2010. Modelling fluxes of water and sediment between the Venice Lagoon and the sea. *Cont. Shelf Res.* 30, 904–914.
- Franco, P., Jeftic, L., Rizzoli, P.M., Michelato, A., Orlic, M., 1982. Descriptive model of the northern adriatic. *Oceanol. Acta* 5.
- Grant, W.D., Madsen, O.S., 1986. The continental shelf bottom boundary layer. *Annual Review of Fluid Mechanics* 18, 265–305.
- Kim, S.Y., Yasuda, T., Mase, H., 2008. Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves. *App. Oc. Res.* 30, 311–322.
- Neumeier, U., Ferrarin, C., Amos, C.L., Umgiesser, G., Li, M.Z., 2008. Sedtrans05: An improved sediment-transport model for continental shelves and coastal waters. *Comput. Geosci.* 34, 1223–1242.
- Oddo, P., Pinardi, N., 2008. Lateral open boundary conditions for nested limited area models: A scale selective approach. *Ocean Mod.* 20, 134–156.
- Oddo, P., Pinardi, N., Zavatarelli, M., 2005. A numerical study of the inter- annual variability of the Adriatic Sea. *Sci. Total Environ.* 353, 39–56.
- Orlic, M., Gacic, M., Violette, P.E.L., 1992. The currents and circulation of the Adriatic Sea. *Oceanol. Acta* 15, 109–124.
- Polli, S., 1960. La propagazione delle maree nell'Alto adriatico. Istituto Sperimentale Talassografico di Trieste 370.
- Pullen, J., Doyle, J.D., Hodur, R., Ogston, A., Book, J.W., 2003. Coupled ocean-atmosphere and nested modeling of the Adriatic Sea during winter and spring 2001. *J. Geoph. Res. - Oceans* 108.
- Roland, A., Cucco, A., Ferrarin, C., Hsu, T.W., Liau, J.M., Ou, S.H., Umgiesser, G., Zanke, U., 2009. On the development and verification of a 2d coupled wave-current model on unstructured meshes. *J. Mar. Syst.* 78, S244–S254.
- Sherwood, C.R., Carnie, S., Cavaleri, L., Chiggiato, J., Das, H., Doyle, J.D., Harris, C.K., Niedoroda, A.W., Pullen, J., Reed, C.W., Russo, A., Sclavo, M., Signell, R.P., Traykowski, P., Warner, J.C., 2004. Sediment Dynamics in the Adriatic Sea Investigated with Coupled Models. *Oceanography* 17, 58–69.

- Smagorinsky, J., 1963. General circulation experiments with the primitive equations, I. The basic experiment. *Mon. Weather Rev.* 91, 99–152.
- Tomasin, A., Pirazzoli, P.A., 1999. The Seiches in the Adriatic Sea. *Atti dell'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti* CLVII, 299–316.
- Trincardi, F., Campiani, E., Correggiari, A., Fogliani, V.M., Remia, A., 2013. Bathymetry of the Adriatic Sea: The legacy of the last eustatic cycle and the impact of modern sediment dispersal. *Journal of Maps* 10, 151 – 158.
- Umgiesser, G., 1997. Modelling the Venice Lagoon. *Inter. J. Salt Lake Res.* 6, 175–199.
- Umgiesser, G., 2000. SHYFEM Finite Element Model for Coastal Seas - User Manual - version 4.56. Pp. 26.
- Umgiesser, G., Bergamasco, A., 1995. Outline of a Primitive Equations Finite Element Model. *Rapporto e Studi, Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, Venice, Italy, XII*, 291–320.
- Umgiesser, G., Melaku Canu, D., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *J. Mar. Syst.* 51, 123–145.
- Zampato, L., Umgiesser, G., Peron, F., 1998. *Sviluppo di un modello di scambio termico all'interfaccia acqua-aria nella Laguna di Venezia*. Technical Report 221. ISDGM/CNR. Venice. Pp. 33.
- Zavatarelli, M., Pinardi, N., Kourafalou, V.H., Maggiore, A., 2002. Diagnostic and prognostic model studies of the Adriatic Sea general circulation: Seasonal variability. *J. Geoph. Res. - Oceans* 107.

## **ALLEGATO A**

### **SIMULAZIONI CELLE DI SVERSAMENTO**

Questo allegato riporta i risultati delle simulazioni effettuate per studiare la dispersione dei sedimenti sversati in tutte le celle di sversamento selezionate.

La metodologia utilizzata, comprendente la descrizione dei modelli matematici e gli scenari, è descritta nel Capp. 2 e 3 del presente rapporto.

## I. DESCRIZIONE DEI SITI DI SVERSAMENTO E DEGLI SCENARI

La zona di sversamento a mare è divisa in celle numerate da C1 a C10 secondo lo schema riportato in Fig. 1.

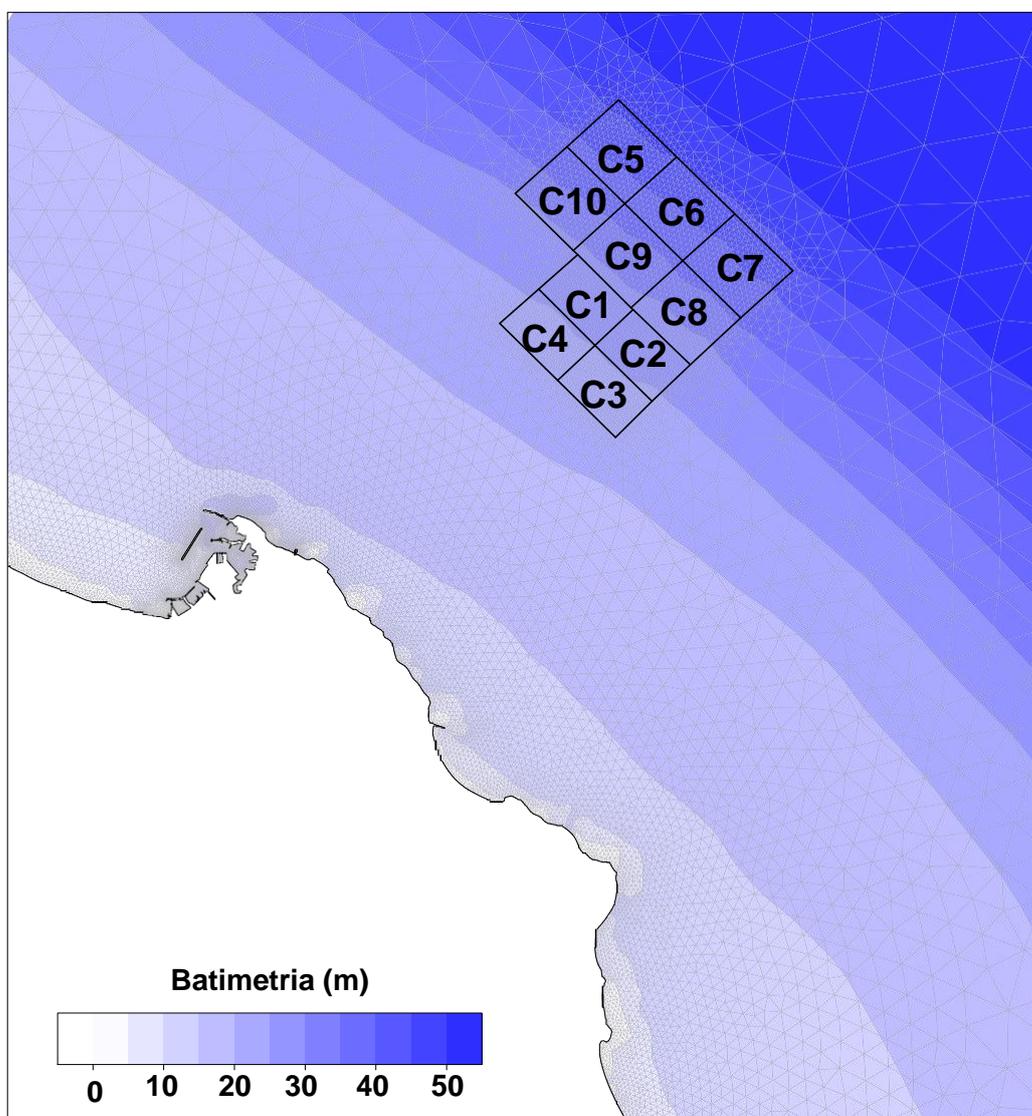


Fig. 1 - Mappa delle celle di sversamento dei sedimenti dragati.

La dispersione dei sedimenti è stata analizzata per ogni cella di sversamento separatamente. Per ogni cella sono state effettuate 4 simulazioni corrispondenti agli scenari meteomarini selezionati:

- S1 - calma di vento;
- S2 - vento di Bora (da nord-nord-est);
- S3 - vento di Scirocco (da sud-est);

- S4 - vento di Maestrale (da nord-ovest);

Le particelle simulate in questo studio sono caratterizzate da una distribuzione granulometrica corrispondente a quella dei sedimenti lavorati nella zona del porto di Ancona che nello specifico comprende:

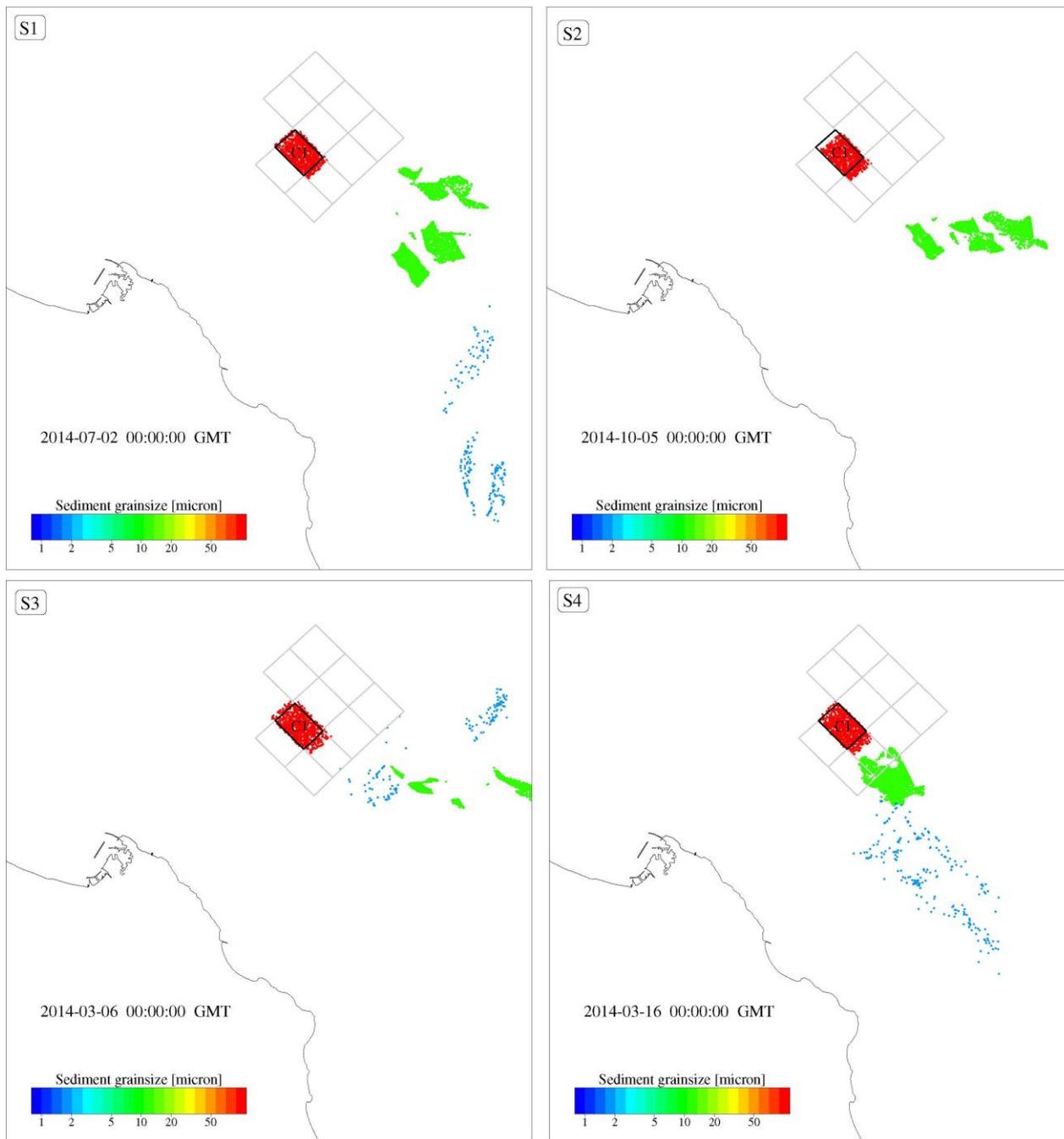
- argilla, 7,5 %;
- silt, 66,5 %;
- sabbie fini, 26,0 %.

## **II. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI**

In questa sezione vengono riportati i risultati della dispersione delle particelle lagrangiane rilasciate nelle diverse celle di sversamento. Per ognuna delle celle di sversamento (C1 - C10) viene mostrato, per ogni scenario meteomarinò, la situazione dopo due giorni dallo sversamento, quando le particelle sono depositate al fondo.

Per ogni cella sono riportate le distanze minime delle particelle dalla costa per gli scenari in cui sembrerebbe verificarsi una situazione critica.

**CELLA 1**

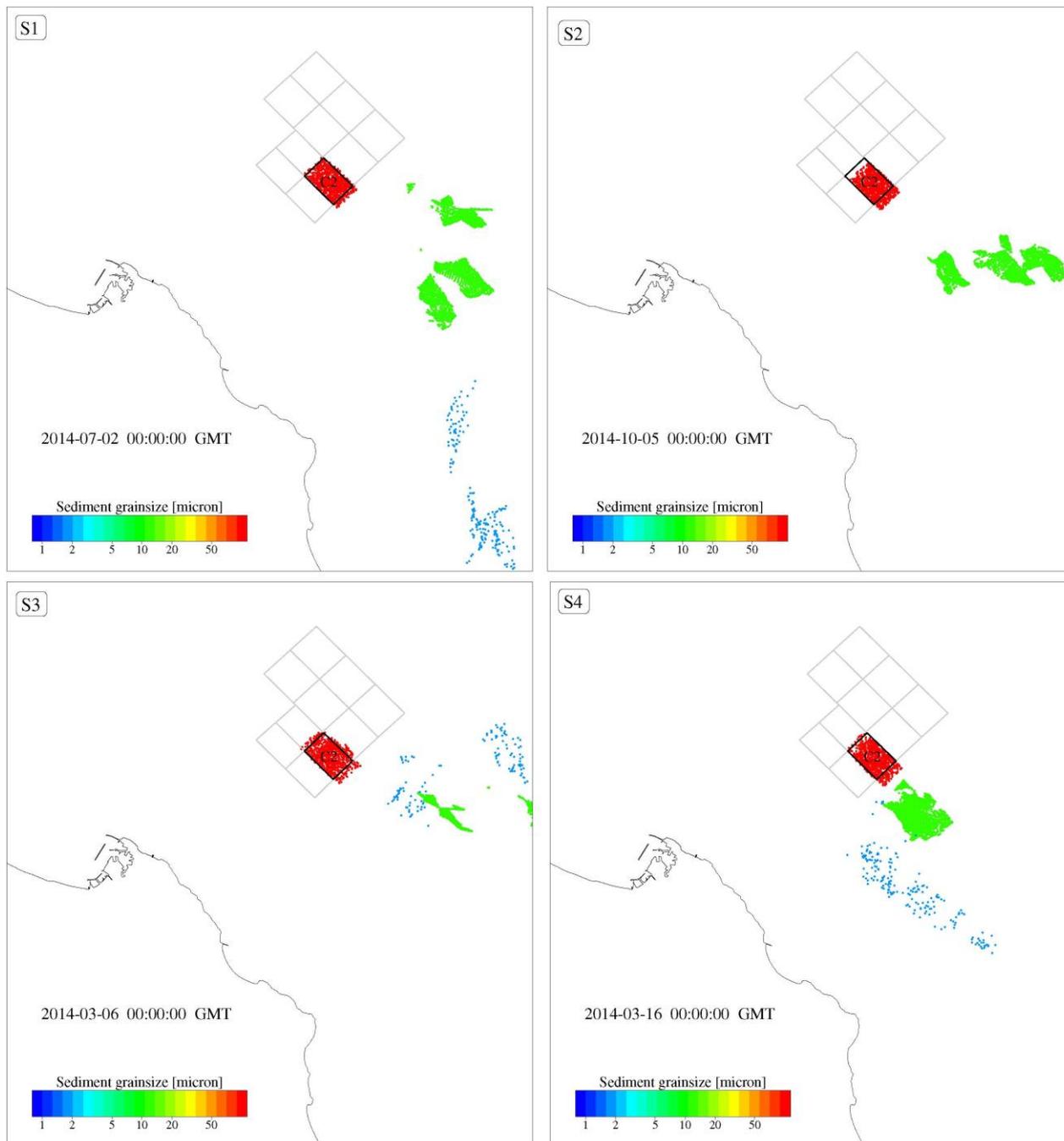


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 3,6 miglia nautiche;

Scenario S4: 3,2 miglia nautiche.

**CELLA 2**

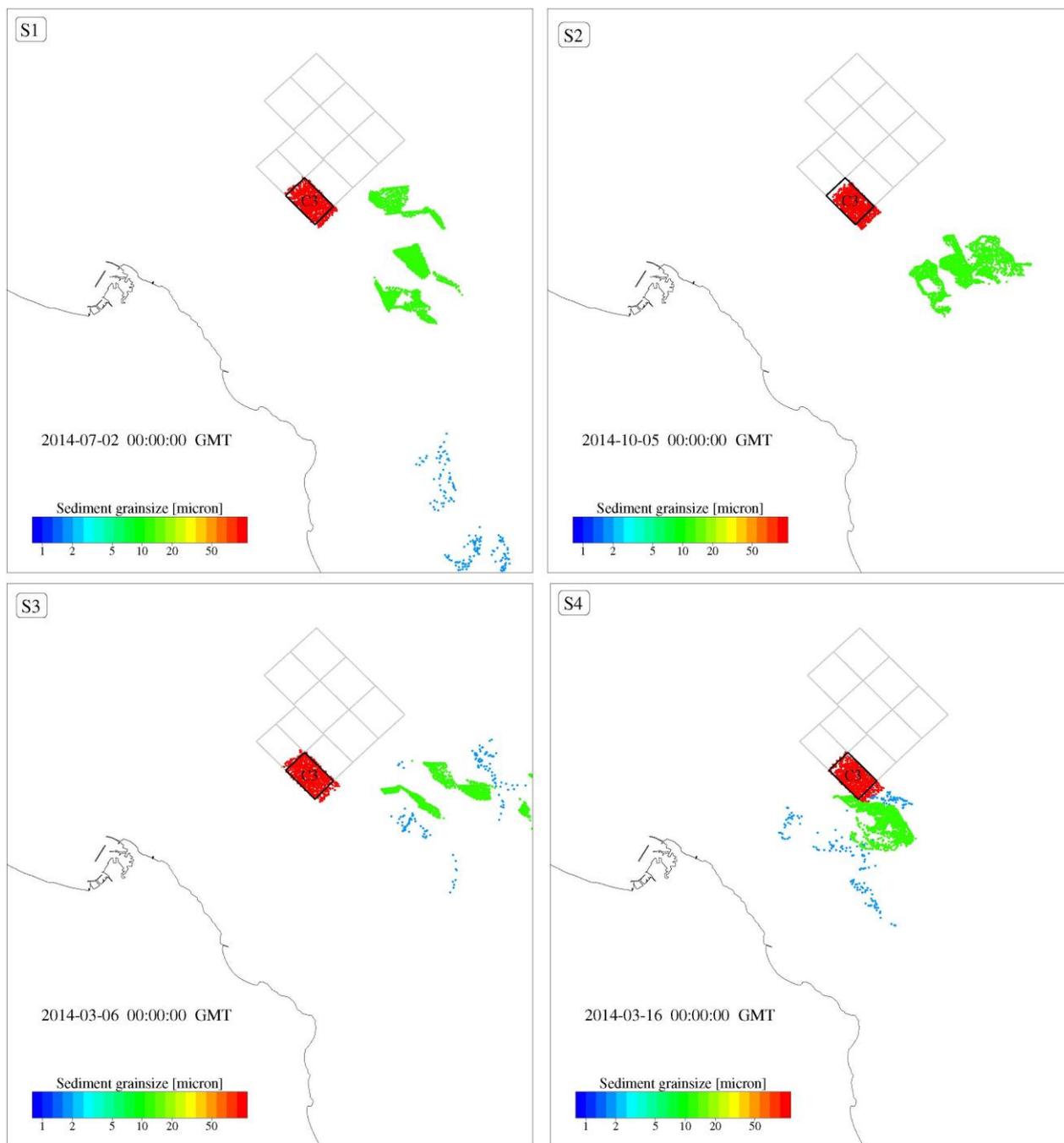


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 3,69 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,97 miglia nautiche.

**CELLA 3**

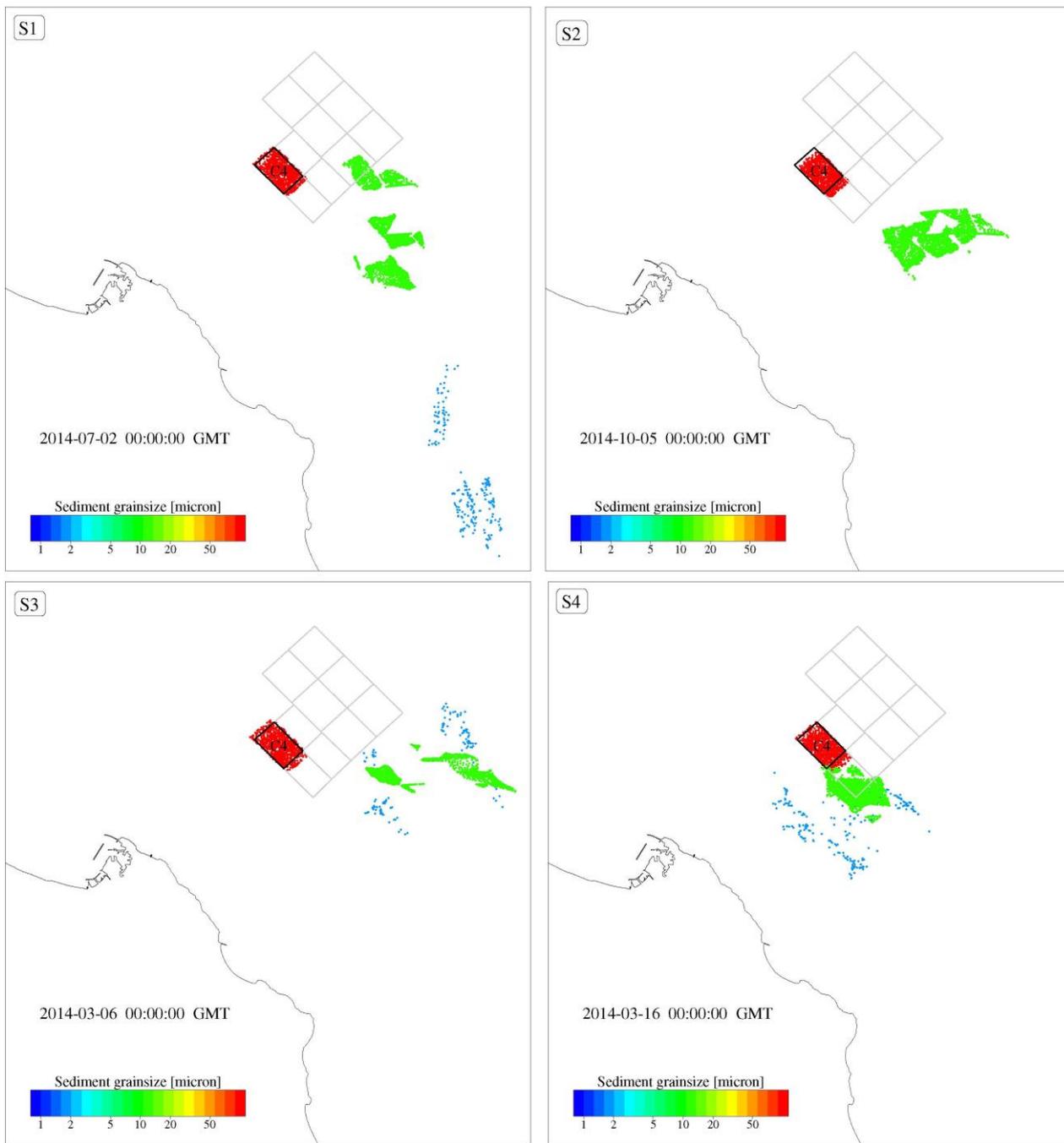


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 2,81 miglia nautiche;

Scenario S4: 1,92 miglia nautiche.

**CELLA 4**

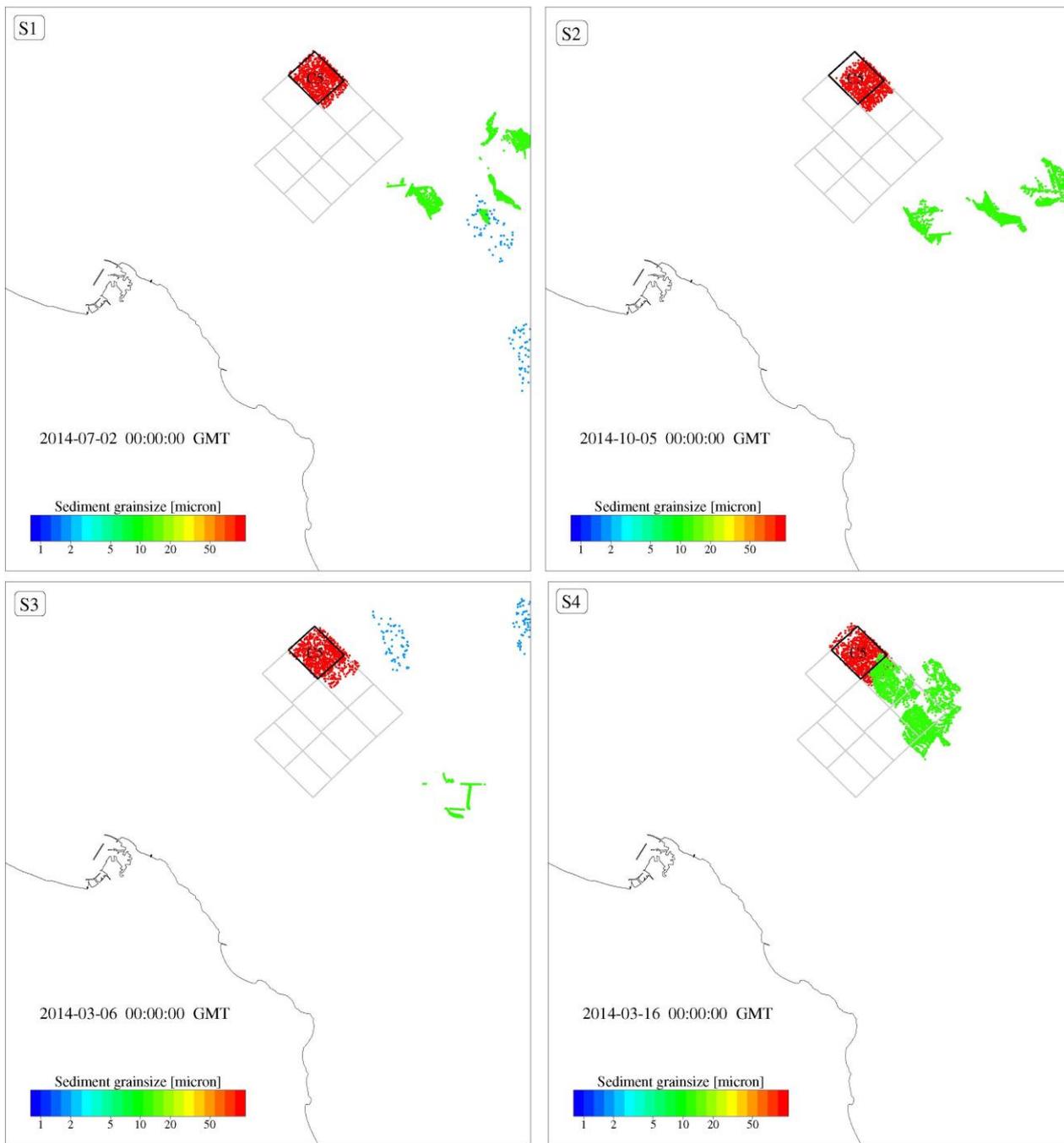


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 3,19 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,13 miglia nautiche.

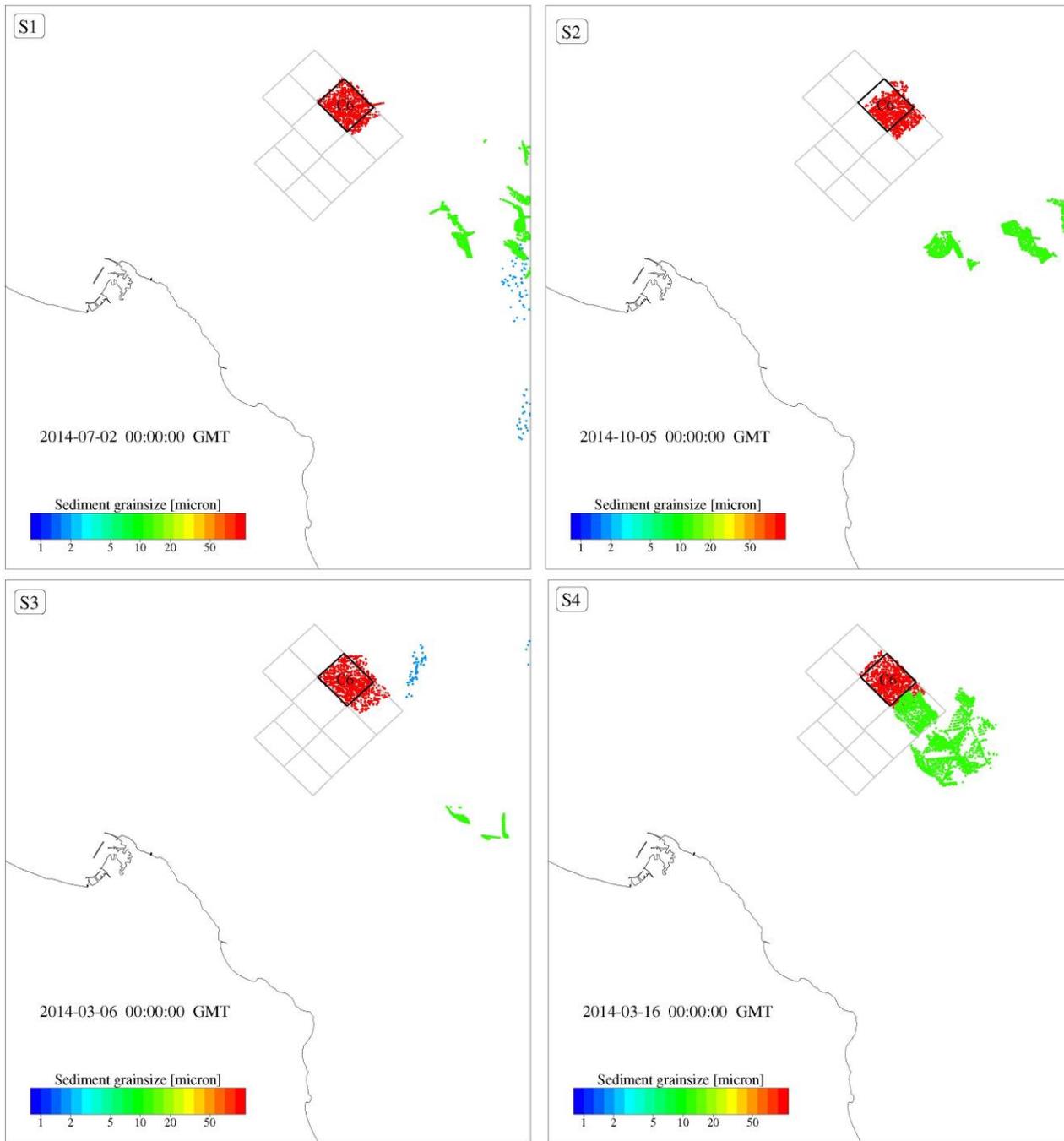
**CELLA 5**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 5,9 miglia nautiche.

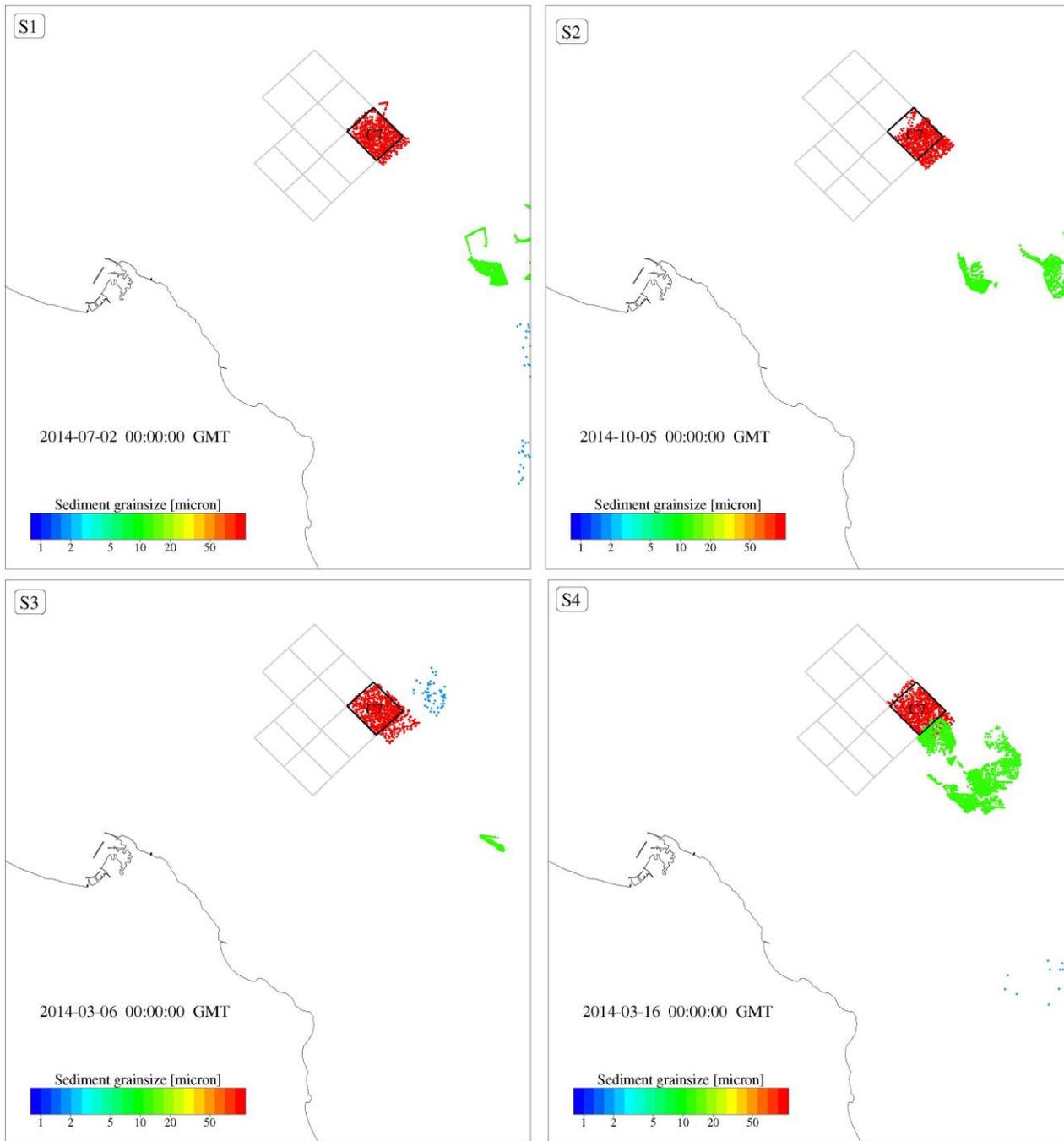
**CELLA 6**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 5,6 miglia nautiche.

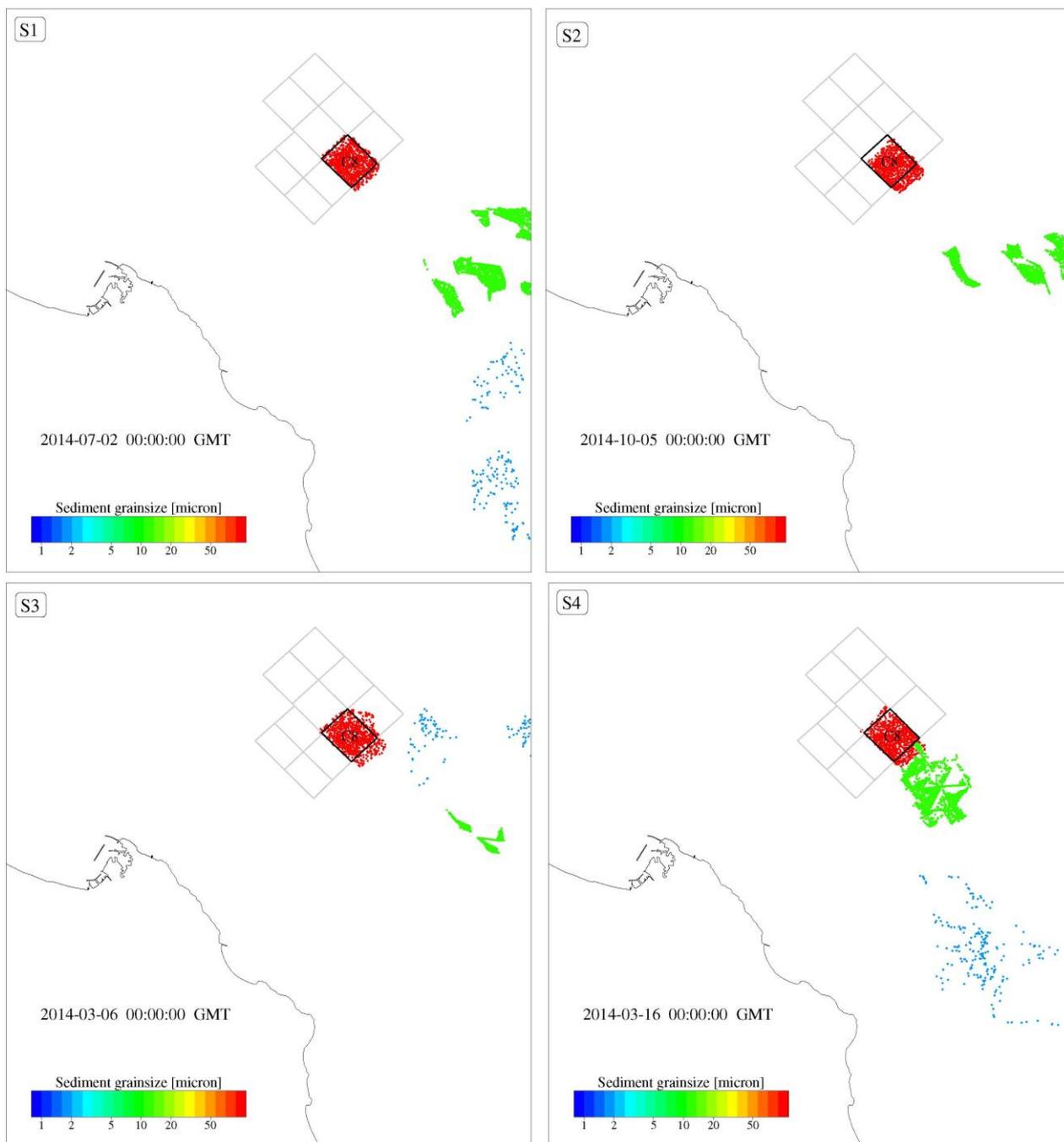
**CELLA 7**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 5,8 miglia nautiche.

**CELLA 8**

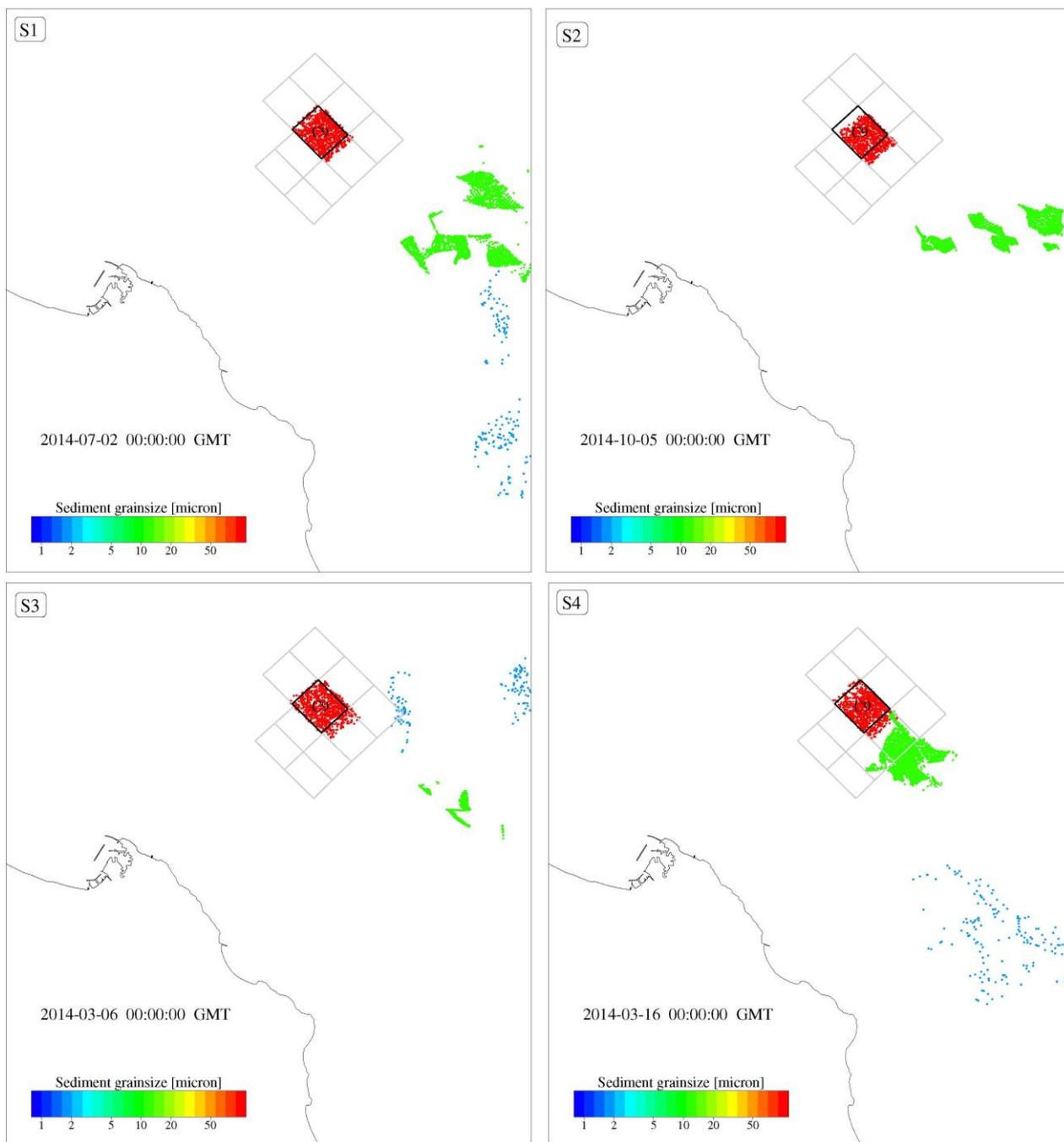


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 4,20 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,51 miglia nautiche.

**CELLA 9**

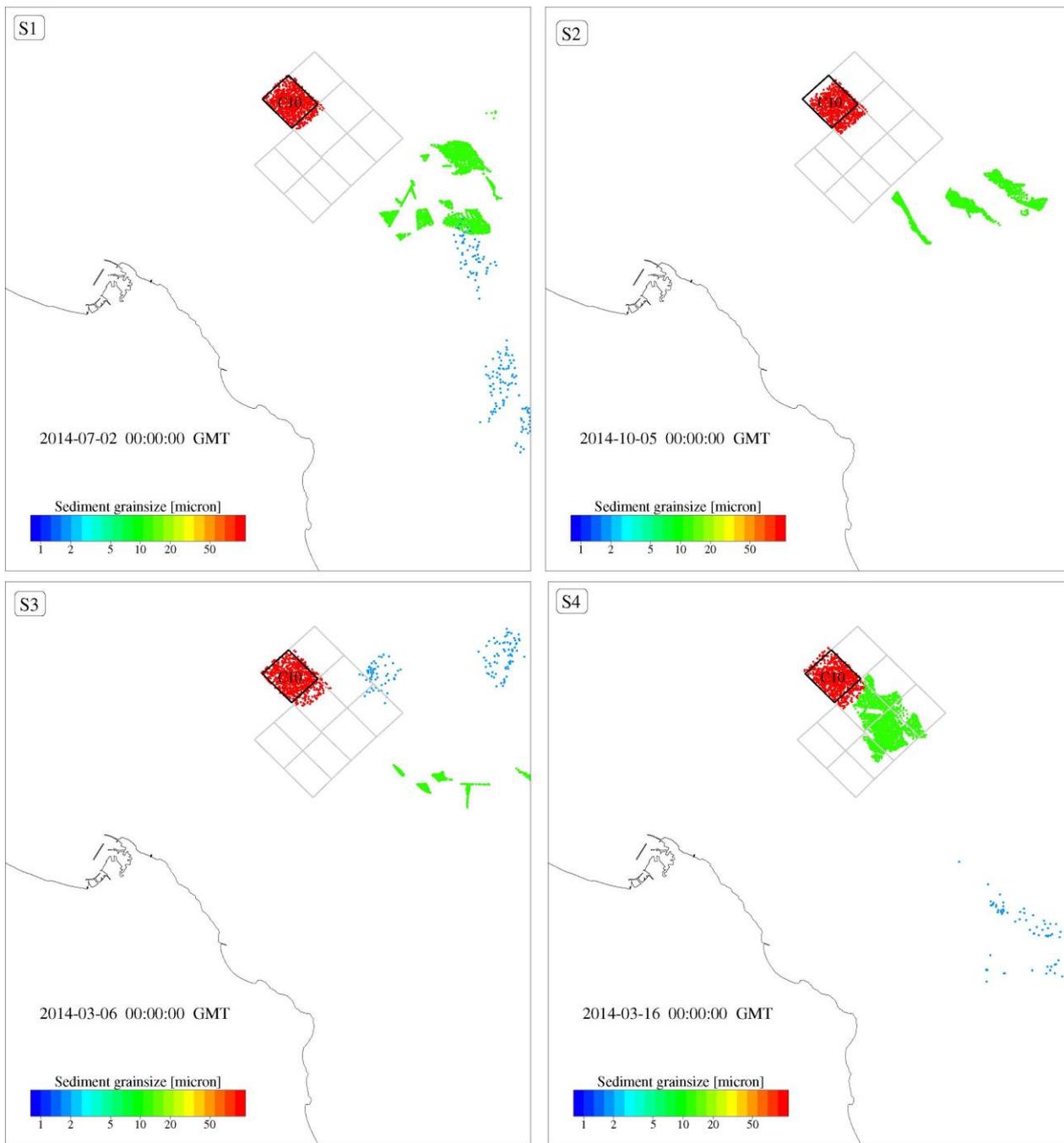


**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 4,50 miglia nautiche;

Scenario S4: 2,78 miglia nautiche.

**CELLA 10**



**Distanza minima dalla costa delle particelle di sedimento.**

Scenario S1: 4,65 miglia nautiche;

Scenario S4: 3,76 miglia nautiche.

### **III. CONCLUSIONI**

In tutte le simulazioni effettuate non risulta che le particelle rilasciate nelle diverse celle di sversamento vengano trasportate sotto costa.

Non si evidenzia alcuna deposizione di particelle lungo la costa del Promontorio del Conero.